

30-0002/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTASY

30-0002(001)

Untersuchung des Verbundverhaltens und der Verbundfestigkeit
von Rippenstäben und glatten Rundstäben bei hohen Temperaturen
(Entwicklung und Erprobung einer Prüfapparatur)

Bericht erstattet von

Akad. OR Dr.-Ing. U. Schneider
Dipl.-Phys. U. Diederichs

August 1977

(überarbeitet August 1978)

Die Untersuchungen wurden im Auftrage des Bundesministeriums für
Raumordnung, Bauwesen und Städtebau durchgeführt
(Az.: B II 5 - 8001 76-1/120 - 8.20).

Postsendungen:
Beethovenstraße 52, 3300 Braunschweig
Erfüllungsort und Gerichtsstand Braunschweig

Fernsprecher: (05 31) 391 22 81

Fernschreiber: 9 52 698 lbatb d

Zur Vermeidung von Verzögerungen wird dringend gebeten, Zuschriften nur an das Institut zu richten, nicht aber an einzelne Mitarbeiter.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
<u>1. Einleitung</u>	1
1.1. Allgemeines	1
1.2. Problemstellung	2
<u>2. Beschreibung der Versuchsanordnung</u>	2
2.1. Vorbemerkung	2
2.2. Aufbau der Ausziehvorrichtung	3
2.3. Aufbau der Heizvorrichtung	6
2.4. Aufbau der Schlupfmeßeinrichtung	11
<u>3. Vorversuche</u>	11
3.1. Aufbau und Herstellung der Probekörper	11
3.2. Versuchsergebnisse	20
3.2.1. Thermische Beanspruchung der Probekörper	20
3.2.2. Kraft-Schlupf-Messungen bei hohen, konstanten Temperaturen	24
3.2.3. Kraft-Schlupf-Messungen bei veränderlichen Temperaturen	28
<u>4. Diskussion der Ergebnisse</u>	34
4.1. Apparativer Aufbau	34
4.2. Ergebnisse der Vorversuche	34
<u>5. Zusammenfassung</u>	35
<u>6. Literaturverzeichnis</u>	36

1. Einleitung

1.1. Allgemeines

Im Stahlbetonbau sind im allgemeinen zwei grundsätzlich unterschiedliche Arten thermischer Beanspruchung zu unterscheiden: ungewollte bzw. zufällig auftretende Temperaturbeanspruchungen und gewollte, d. h. planmäßig auftretende Temperaturbeanspruchungen. Ungewollte Temperaturbeanspruchungen treten häufig im Zusammenhang mit Katastrophenfällen auf, z. B. bei Bränden oder Explosionen, wobei der Brandfall naturgemäß an erster Stelle zu nennen wäre. Planmäßige Temperaturbeanspruchungen sind beispielsweise im Silo- bzw. Schornsteinbau sowie im Spannbetondruckbehälterbau anzutreffen. Den konstruierenden Ingenieur interessieren deshalb die bei hohen Temperaturen auftretenden Änderungen der mechanischen Eigenschaften von Stahlbeton.

In den zurückliegenden Jahren wurden aus diesem Grunde im In- und Ausland umfangreiche Hochtemperaturuntersuchungen an Betonprobekörpern durchgeführt. Ziel dieser Arbeiten war, die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Betonen unter hohen Temperaturen zu ermitteln und die Ursachen und Gründe für die thermisch bedingten Materialänderungen zu erforschen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden umfangreiche Ergebnisse und Erkenntnisse über das Temperaturverhalten von Betonen gewonnen; allerdings sind auch noch einige wichtige Fragen offengeblieben. Soweit die Verbundfestigkeit des Betons bei hohen Temperaturen betroffen ist, kann gesagt werden, daß darüber bisher praktisch nichts bekannt ist. Es liegen bis heute zu diesem Problem nur zwei ältere Veröffentlichungen aus Japan und den UdSSR vor, wobei der praktisch wichtigste Fall, nämlich der Verbund von Rippenstählen, nur in einer einzigen Meßreihe untersucht wurde. Eine Klärung der Abhängigkeit des Verbundverhaltens von der Temperatur für Konstruktionsbetone ist jedoch dringend erforderlich, weil das Verhalten von Stahlbetonbauteilen unter thermischer Beanspruchung in vielen Fällen nur unter Berücksichtigung der Verbundeigenschaften im Hochtemperaturbereich mit ausreichender Genauigkeit theoretisch vorhergesagt werden kann.

1.2. Problemstellung

Die Messung der Verbundfestigkeit von Rippen- und glatten Rundstäben bei erhöhten Temperaturen ist außerordentlich schwierig, vor allem auch deshalb, weil über die experimentelle Durchführung derartiger Hochtemperaturmessungen kaum Erfahrungen vorliegen. Bereits bei Raumtemperatur ist die Meinung der einzelnen Forscher über die "richtige" Versuchsmethodik geteilt, so daß es im internationalen Bereich bislang nicht möglich war, hierüber eine Einigung zu erzielen. Ohne die einzelnen Methoden hinsichtlich ihrer Zweckmäßigkeit für dieses Vorhaben weiter diskutieren zu wollen, sei hier nur erwähnt, daß es uns wichtig erschien, zunächst eine relativ einfache, insbesondere bezüglich der Temperaturerzeugung bzw. -aufbringung möglichst zuverlässig und reproduzierbar arbeitende Versuchsmethode zu entwickeln. Es bot sich somit an, ausgehend von dem sogenannten "pull-out-test", eine Versuchsanordnung für zylindrische Probekörper zu entwickeln, wobei folgende Voraussetzungen einzuhalten waren:

- a) Erstellung einer Ausziehapparatur mit der Möglichkeit, bei Temperaturen bis 800°C geregelte Ausziehversuche durchzuführen.
- b) Entwicklung einer Heizvorrichtung, die unabhängig vom hydraulischen System arbeitet und deren Leistung in Abhängigkeit von der Probentemperatur regelbar ist, so daß eine möglichst homogene Temperaturverteilung in der Verbundzone bzw. im gesamten Versuchskörper erzielt wird.
- c) Entwicklung eines Dilatometers zur Messung des Schlupfes am unbelasteten Stabende bei hohen, auch veränderlichen Temperaturen.
- d) Erstellung einer Stahlschalung zur Herstellung von Probekörpern mit unterschiedlichen Abmessungen und Verbundlängen.

2. Beschreibung der Versuchsanapparatur

2.1. Vorbemerkung

Im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig werden seit vielen Jahren gezielt Hochtemperaturversuche an Betonen durchgeführt. Die bei der Erstellung und beim Betrieb der dazu erforderlichen Anlagen gewonnenen Erfahrungen konnten bei der Entwicklung und beim Bau der Hochtemperatur-Ausziehanlage genutzt werden.

Die Hochtemperatur-Ausziehanlage besteht im wesentlichen aus drei Komponenten:

- a) einem servohydraulischen Prüfstand,
- b) einem elektrisch beheizbaren 3-Zonen-Kammerofen und
- c) einem Hochtemperatur-Dilatometer.

2.2. Aufbau der Ausziehvorrichtung

Der mechanische Teil der Ausziehvorrichtung (s. Bild 1) besteht im wesentlichen aus einer kreisförmigen Druckplatte, einem Stahlzylinder und einer Hohlkolbenpresse, die auf einer Konsole befestigt sind. Die Druckplatte aus zunderfreiem, warmfesten Stahl und der obere Teil des Zylinders befinden sich im Ofenraum. Am unteren Teil des Stahlzylinders ist ein Flansch angeschweißt. Zwischen diesem und einem weiteren Flansch, der auf der Konsole befestigt ist, ist die Hohlkolbenpresse eingebaut. Am freien Ende des Hohlkolbens ist ein Ringkraftaufnehmer befestigt. Der Ringkraftaufnehmer dient als

- Istwertgeber für den Hydraulikregelkreis und zur
- Messung der angelegten Prüfkraft (Verbundkraft).

Den Kraftschluß zwischen Bewehrungsstab und Kraftmeßdose sowie Hohlkolbenpresse übernimmt eine Klemmvorrichtung, wie sie als Keilverankerung im Spannbetonbau üblich ist. Die Kraftregelung erfolgt servohydraulisch (s. Bild 2). Das Hydraulikaggregat erzeugt im Ölkreislauf einen bestimmten Öldruck, der über das Servoventil zum Belastungszyylinder geführt wird. Eine Meß- und Regeleinheit übernimmt die Steuerung der Anlage. Die Regelung arbeitet im geschlossenen Regelkreis. An einem in der Meß- und Regeleinheit eingebauten Sollwertpotentiometer kann die gewünschte Kraft eingestellt werden. Über ein weiteres Potentiometer wird die Ausfahrgeschwindigkeit des Hohlkolbens bzw. die Lastanstiegsgeschwindigkeit bestimmt. Die Kraftmeßdose auf der Kolbenstange des Zylinders ist mit dem Prüfling durch die Keilverankerung verbunden und liefert den Istwert. Der Istwert wird zur Regelung geführt und ständig mit dem Sollwert verglichen, und je nach Abweichung wird das Regelventil gesteuert.

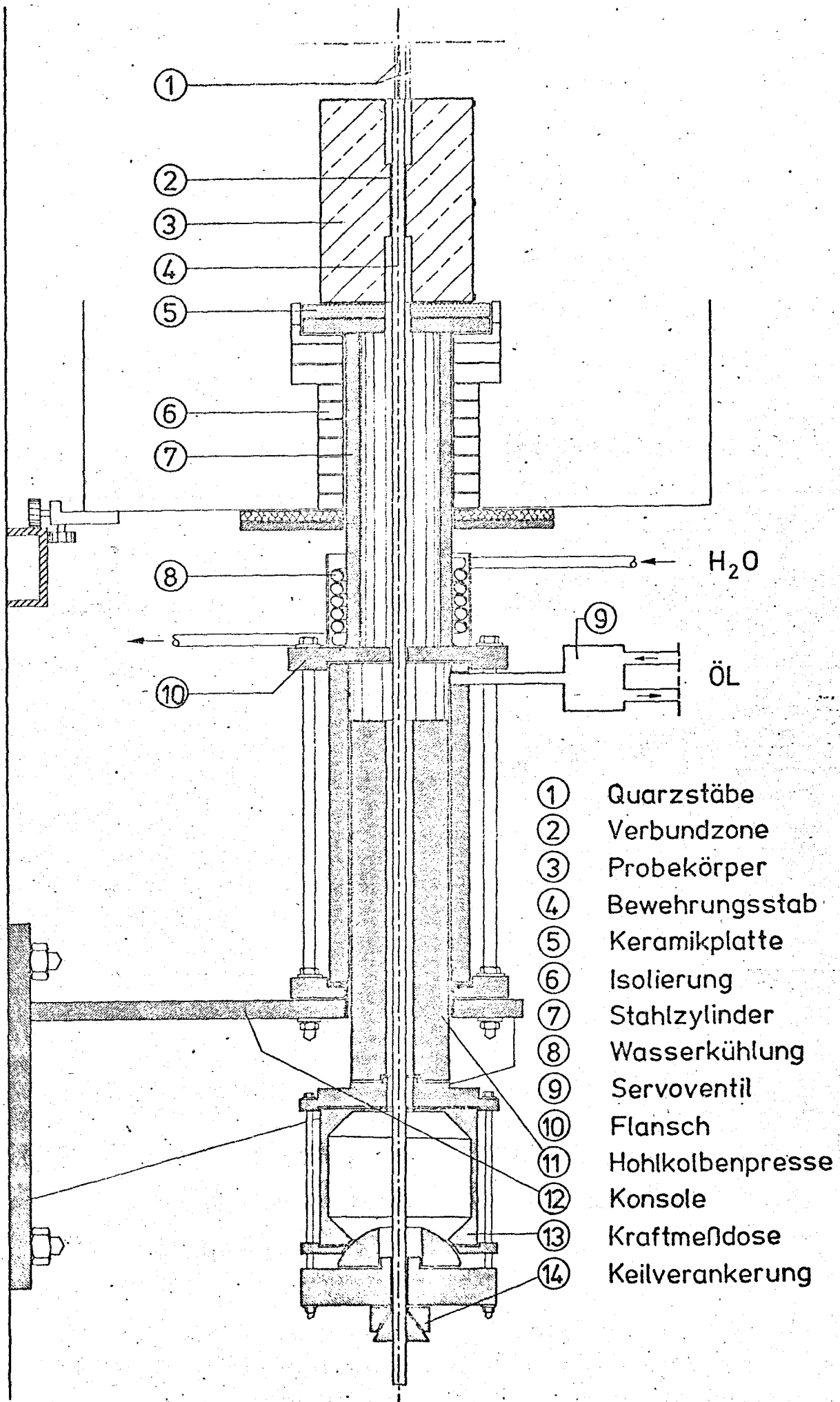


Bild 1: Ansicht der Ausziehvorrichtung

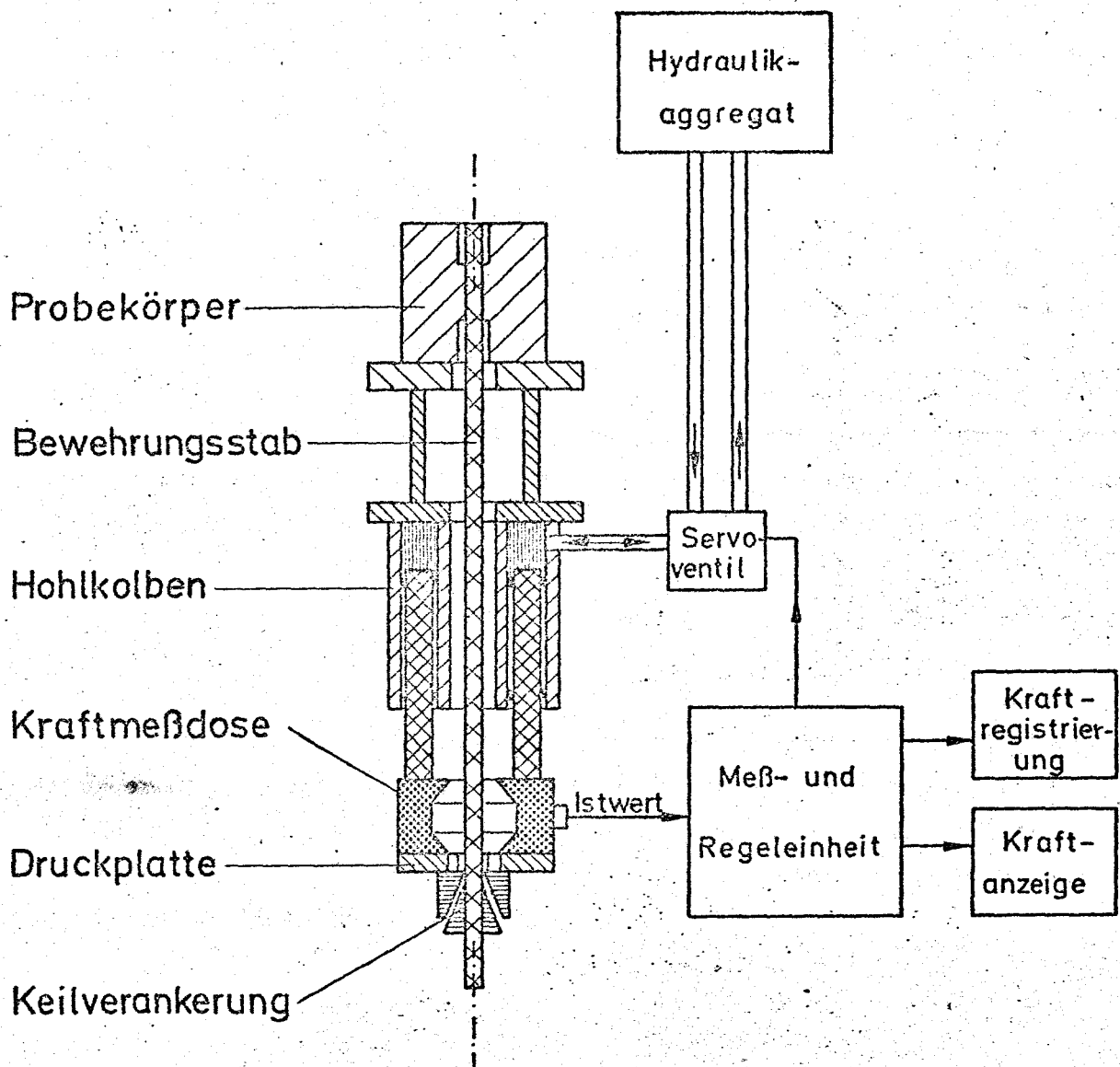


Bild 2: Zusammenwirken der servohydraulischen Meß- und Regeleinheit bei Belastung des Probekörpers

An einem in die Meß- und Regeleinheit eingebauten Digitalvoltmeter kann die jeweils anliegende Kraft abgelesen werden. Zur Aufzeichnung des Belastungsverlaufs kann über eine Buchse auf der Frontseite der Regelung ein hochohmiger Schreiber angeschlossen werden.

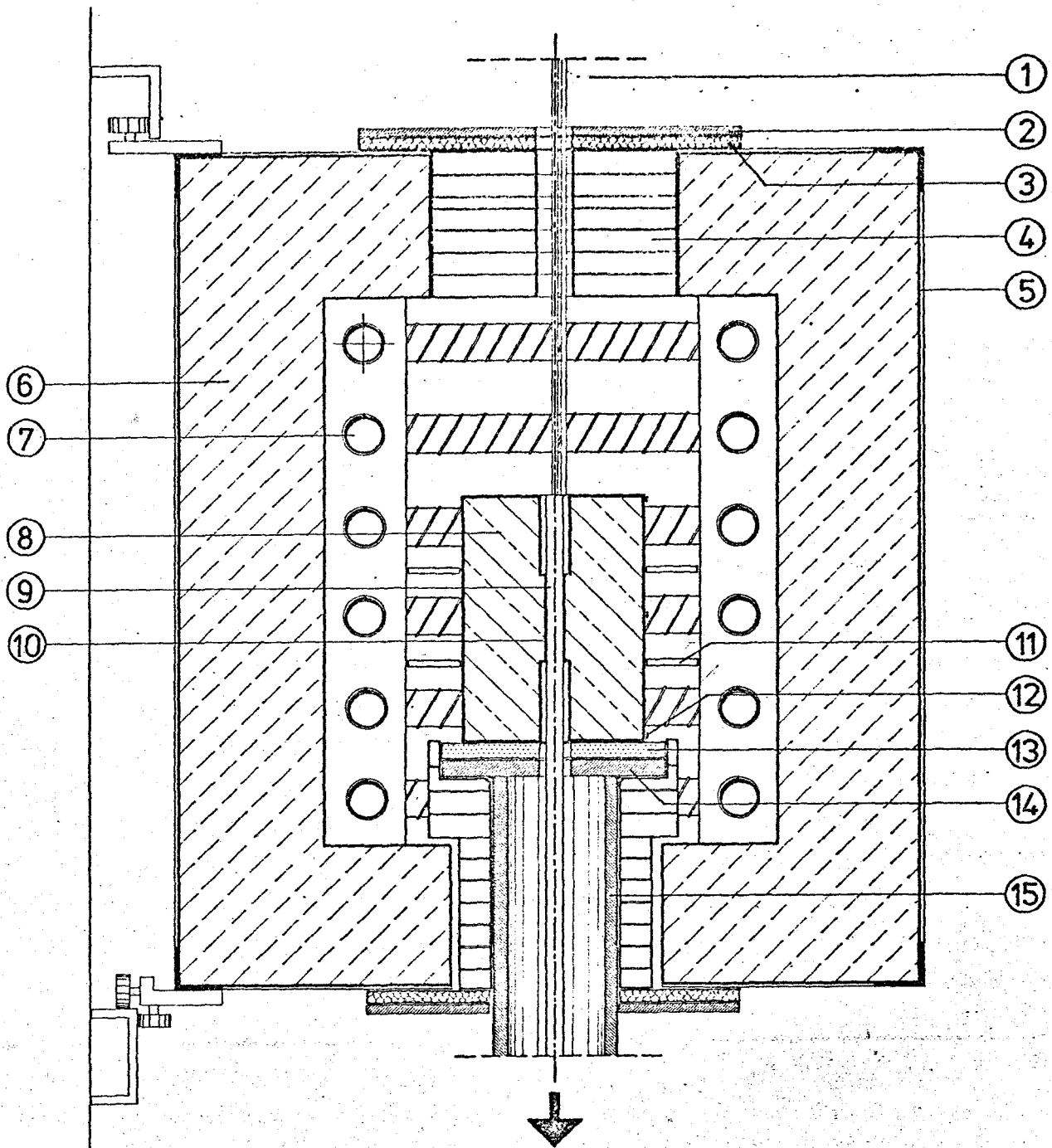
Der untere, außerhalb des Ofens liegende Teil des Stahlzylinders muß gekühlt werden, da bei Ofentemperaturen über 300°C die natürliche Konvektion nicht ausreicht, um eine Überhitzung und damit verbunden eine Schädigung des Hydrauliköls im Ölkreislauf zu verhindern. Als besonders günstig hat sich eine Wasserkühlung erwiesen. Dazu ist der Stahlzylinder mit einem Kupferrohr umwickelt. Das Rohr wird mittels Stahlschellen an einen Stahlzylinder gepreßt. Dieses Kühlsystem gewährleistet, daß sich der untere Stahlflansch des Stahlzylinders selbst bei 800°C Ofentemperatur nicht überhitzt und die Hohlkolbenpresse nicht über 80°C erwärmt wird.

Um den Wärmefluß aus dem Ofen durch den gut wärmeleitenden Stahl zu vermindern und einen möglichst kleinen axialen Temperaturgradienten im Probekörper zu erreichen, ist zwischen Probekörper und Platte eine Keramikscheibe angeordnet. Außerdem sind die Druckplatte, die Keramikscheibe und der im Kammerofen befindliche Teil des Stahlzylinders mit einer Wärmeisolationsschicht von 2 - 3 cm Dicke versehen.

2.3. Aufbau der Heizvorrichtung

Der Probekörper wird in einem elektrisch beheizten Kammerofen erwärmt. Er besteht im wesentlichen aus einem Rahmen aus Winkeleisen und einer Blechhülle. Die Innenauskleidung besteht aus Silikatsteinen, in die Nuten zur Aufnahme der Heizkörper eingearbeitet sind. Die Heizkörper bestehen aus Keramiktragröhren mit spiralförmig aufgewickelten Drähten, einer Eisen-Chrom-Aluminium-Legierung. Eine schematische Darstellung des Ofens ist auf Bild 3 zu finden.

Der Kammerofen ist über Rollenlager und Profileisen mit dem Ständerwerk verbunden und kann bei geöffneter Fronttür leicht verschoben werden, so daß die Druckplatte von allen Seiten her gut zugänglich wird und ein bequemer Einbau sowie eine genaue Justierung des Probekörpers gewährleistet sind.



- | | |
|-----------------|--------------------|
| ① Quarzstäbe | ⑨ Bewehrungsstab |
| ② Abdeckblech | ⑩ Verbundzone |
| ③ Mineralwolle | ⑪ Konvektionsblech |
| ④ Isolierung | ⑫ Thermoelement |
| ⑤ Blechhülle | ⑬ Keramikplatte |
| ⑥ Silikatsteine | ⑭ Druckplatte |
| ⑦ Heizelement | ⑮ Stahlzylinder |
| ⑧ Probekörper | |

Bild 3: Ansicht des 3-Zonen-Kammerofens

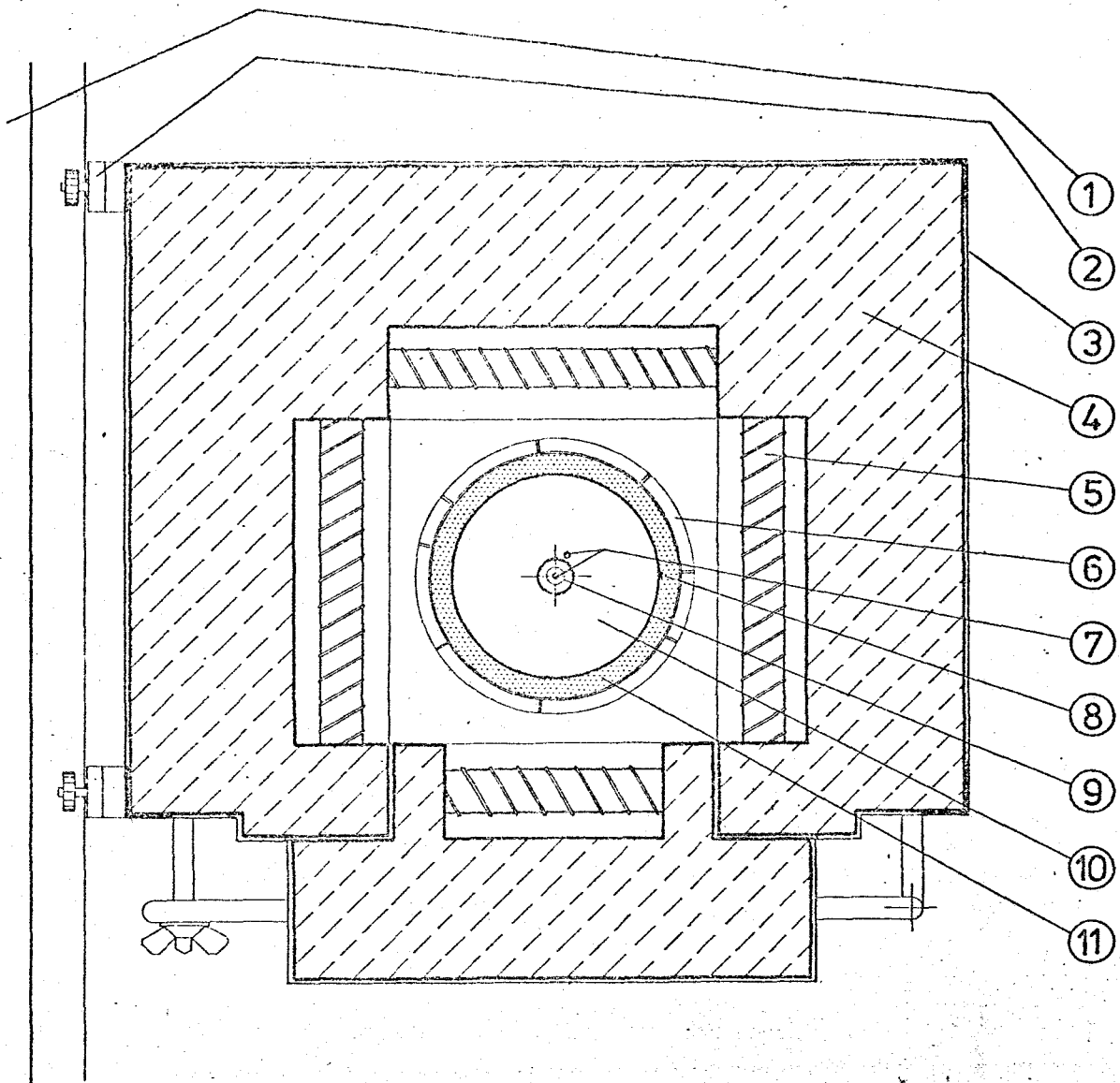
Die obere Aussparung im Ofen (Durchmesser: 260 mm) wird mit einem Stopfen aus Promabest verschlossen, der mit dem Abdeckblech verbunden ist. Eine Zwischenschicht aus Mineralwolle verhindert das Entweichen der heißen Luft aus dem Ofeninnern. Die Abdeckung enthält eine Bohrung, durch die Quarzstäbe zur Schlupfübertragung auf das Dilatometersystem geführt werden (vergl. Bild 4).

An den Ofenboden ist eine 5 mm starke Stahlplatte angeschweißt, die zur Aussteifung des Ofens erforderlich ist. Die Stahlplatte enthält einen Ausschnitt, der den Stahlzylinder eng umschließt. Eine Mineralwollschicht zwischen Stahlplatte und Ofenboden verhindert eine zu starke Erwärmung der Stahlplatte und dichtet gleichzeitig den Ofen ab.

Um den Temperaturgradienten in horizontaler Richtung möglichst gering zu halten, ist die Heizung des Ofens in 3 Heizzonen aufgeteilt, die unabhängig voneinander geregelt werden können. Zur thermischen Entkopplung der drei Heizzonen dienen die Konvektionsbleche. Die Temperaturregelung erfolgt elektronisch im geschlossenen Regelkreis, und zwar für jede Heizzone getrennt. Den prinzipiellen Aufbau der Regelung zeigt Bild 5. Den Istwertgeber für die entsprechenden Heizzonen bilden NiCr-Ni-Thermoelemente, die direkt am Probekörper angebracht sind. Ein Sollwertgeber liefert das Vergleichssignal. Soll- und Istwert werden im Führungsregler ständig verglichen. Das erzeugte Differenzsignal dient zur Steuerung des Thyristorstellgliedes, das in Phasenanschnittsteuerung arbeitet.

Die beiden Seitenregler (Regler I und Regler II von Bild 5), die ebenso wie der Führungsregler als PID-Regler aufgebaut sind, erhalten ihren Istwert ebenfalls aus Thermoelementen von der Probenoberfläche, als Sollwertgeber dient hier jedoch der Führungsregler.

Der Sollwertgeber gestattet es, lineare bzw. rampenförmige Temperaturprogramme vorzugeben, wobei die Aufheizgeschwindigkeiten zwischen 20,5 K/min (≈ 1.230 K/h) und 0,02 K/min ($\approx 1,2$ K/h) variiert werden können. Die Maximaltemperatur wird über ein Potentiometer am Führungsregler eingestellt. Die Haltezeit kann an einer Schaltuhr vorgewählt werden. Die Abkühlung kann ebenfalls geregelt erfolgen. Die Regelung versagt, wenn die natürliche Abkühlgeschwindigkeit des Ofens, die sich exponentiell mit der Zeit verringert, von der gewählten Abkühlgeschwindigkeit überschritten wird.



- | | |
|-----------------|------------------|
| ① Ständer | ⑦ Quarzstäbe |
| ② Rollenlager | ⑧ Thermoelement |
| ③ Blechhülle | ⑨ Bewehrungsstab |
| ④ Silikatsteine | ⑩ Probekörper |
| ⑤ Heizelement | ⑪ Keramikplatte |
| ⑥ Isolierung | |

Bild 4: Draufsicht des 3-Zonen-Kammerofens

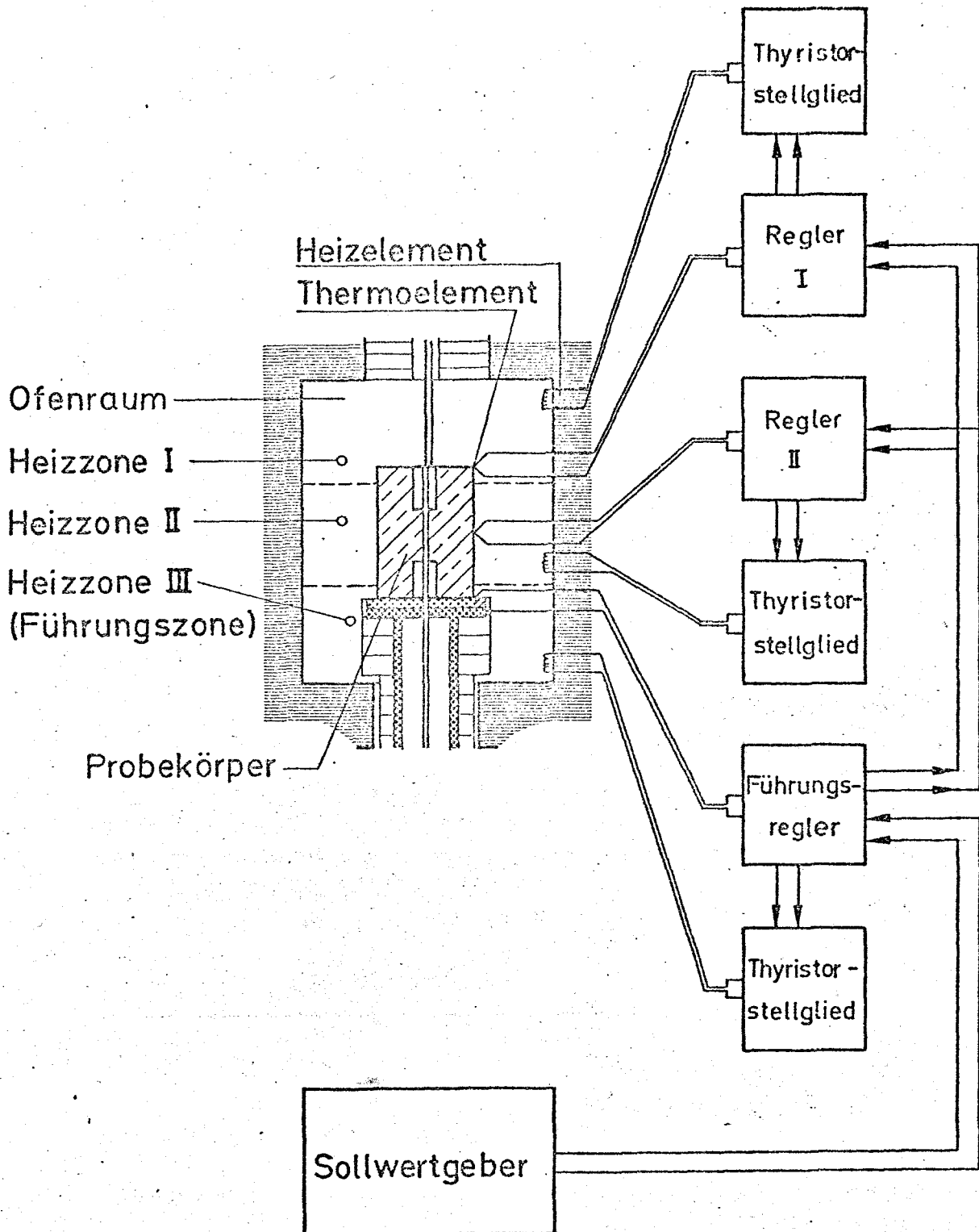


Bild 5: Prinzip der 3-Zonen-Regelung des Kammerofens

2.4. Aufbau der Schlupfmeßeinrichtung

Zur Messung des Schlupfes des unbelasteten Stahlendes im heißen Ofenraum werden zwei Kieselglasstäbe aus dem Ofen herausgeführt und jeweils durch ein Parallelenkersystem (s. Bild 6) leicht gegen den Bewehrungsstab bzw. gegen den Betonprobekörper gedrückt. Das eine Parallelenkersystem enthält eine Halterung, in die der Aufnehmerkörper eingespannt wird. Die Tastspitze, die über einen kleinen Stahlzylinder den Tauchanker führt, wird federnd gegen das zweite Parallelenkersystem gedrückt. Im induktiven Wegaufnehmer, der nach dem Prinzip des Differential-Transformators arbeitet, wird ein elektrisches Meßsignal erzeugt, das nach geeigneter Verstärkung und Gleichrichtung in einem Meßverstärker mit Hilfe eines Linien- oder x-y-Schreibers aufgezeichnet werden kann. Außerdem enthält die Meßeinheit ein Digitalvoltmeter, das den Schlupf bzw. unterschiedliche thermische Dehnungen zwischen Beton und Bewehrungsstab direkt anzeigt.

Die thermische Dehnung der Kieselglasstäbe braucht hier nicht gesondert berücksichtigt zu werden, da sich die Stäbe in gleicher Länge im heißen Ofenraum befinden und sich ihre thermischen Dehnungen aufgrund des Meßprinzips (Differenzenmessung) herausheben, sofern eine gleichartige Erwärmung beider Stäbe vorausgesetzt werden kann. Im vorliegenden Fall trifft dies zu, wie Vergleichsmessungen gezeigt haben.

3. Vorversuche

3.1. Aufbau und Herstellung der Probekörper

Bei der Auswahl einer Betonmischung und eines Stahls für die Vorversuche waren einige grundsätzliche Dinge zu beachten, da es vor allem darauf ankam, lediglich die neuartige Versuchsanlage zu testen. Es bot sich deshalb an, zunächst einen praxisüblichen Normalbeton in Verbindung mit einem "gängigen" Baustahl zu verwenden. Um jedoch schon aus der Vorserie gewisse Aussagen zu gewinnen, sollten einige wesentliche Kenntnisse über das physiko-chemische bzw. mechanische Hochtemperaturverhalten der beiden Materialkomponenten Beton und Stahl vorhanden sein. Im Sonderforschungsbereich 148

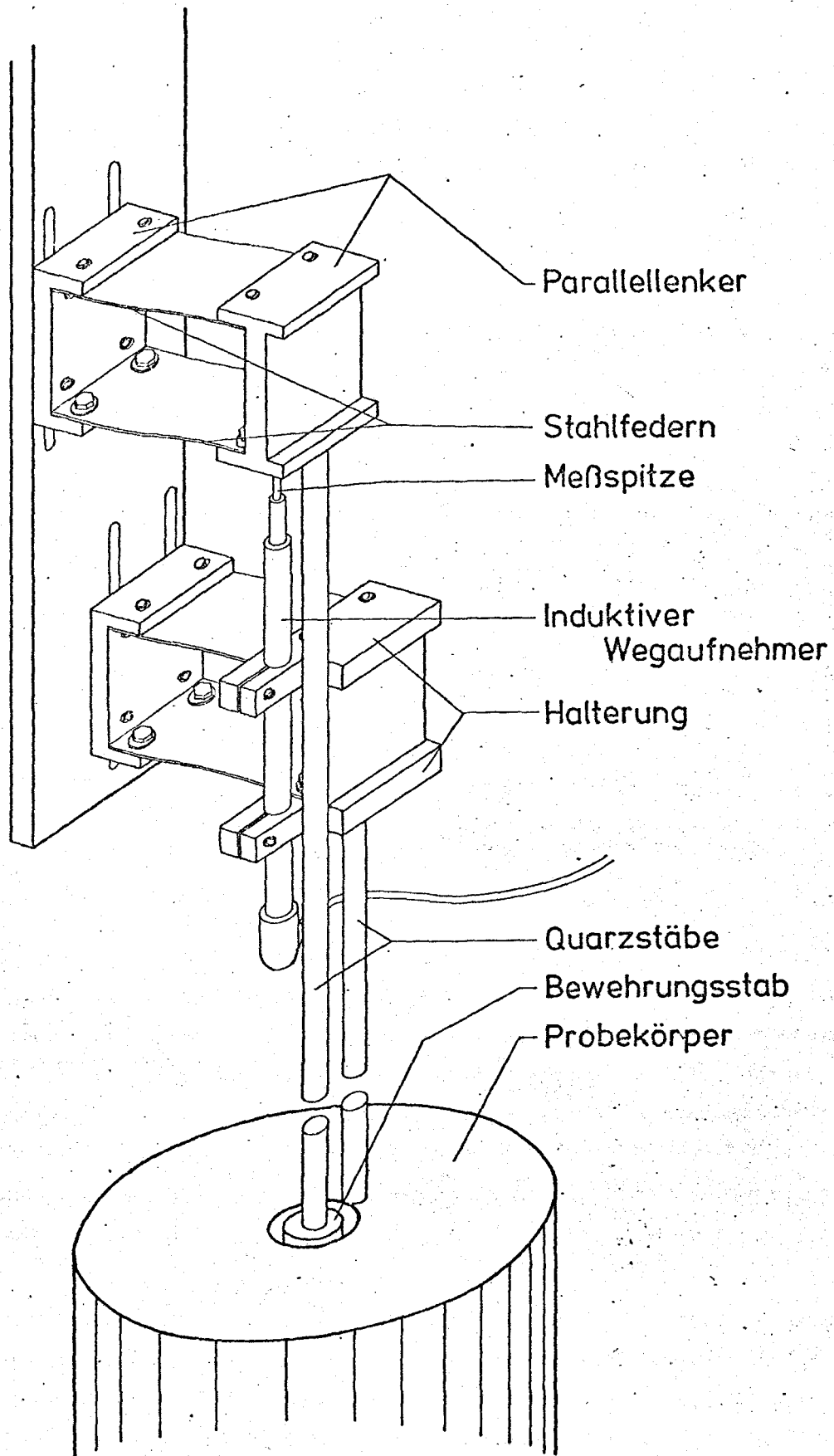


Bild 6: Parallelenker und Dilatometerstäbe
der Schlupfmeßeinrichtung

"Brandverhalten von Bauteilen" wurde besonders intensiv ein Kiesbeton auf Portlandzementbasis mit im wesentlichen quarzhaltigen Zuschlägen untersucht [1], der für das Betonieren einer Vorserie geeignet erschien. Der Mischungsaufbau sowie einige Frischbetondaten gehen aus Tabelle 1 hervor. Als Stahl wurden ein Rippentorstahl der Qualität III (BST 420/500 RK) gewählt, einmal wegen seiner häufigen Anwendung im Bauwesen, zum anderen, weil über ihn ebenfalls Erfahrungen über sein Hochtemperaturverhalten vorliegen [2].

T a b e l l e 1

Mischungsaufbau und Frischbetonwerte des verwendeten Betons

Portlandzement 350 F .	360 kg/m ³
Kieszuschlag 0 - 2 mm	653 kg/m ³
Kieszuschlag 2 - 8 mm	500 kg/m ³
Kieszuschlag 8 - 16 mm	768 kg/m ³
Gesamtwasser	178 kg/m ³
Frischbetonrohddichte	2,39 kg/dm ³
Rohddichte (28 Tage)	2,37 kg/dm ³
Ausbreitmaß	35,5 cm

Einen entscheidenden Einfluß auf die Dimensionierung der Probekörper hatte die Forderung, den Körper möglichst isotherm aufzuheizen. Quasi-isotherme Verhältnisse sind im Prinzip immer durch Wahl einer kleinen Aufheizgeschwindigkeit der Probe zu erreichen. Jedoch sollte die Aufheizgeschwindigkeit so gewählt werden, daß pro Arbeitstag ein Ausziehversuch bis 500 °C durchgeführt werden kann, woraus sich eine minimale Aufheizgeschwindigkeit von 1 °C/min ergibt.

Für zylindrische Probekörper endlicher Länge mit einem Schlankheitsgrad $L/D = 4$ aus Beton hat Schneider [3] für den Fall einer linearen Aufheizung der Mantelflächen die Temperaturfelder berechnet. Das Ergebnis ist in Bild 7 dargestellt, wobei θ die dimensionslose Temperatur in der Probe ist.

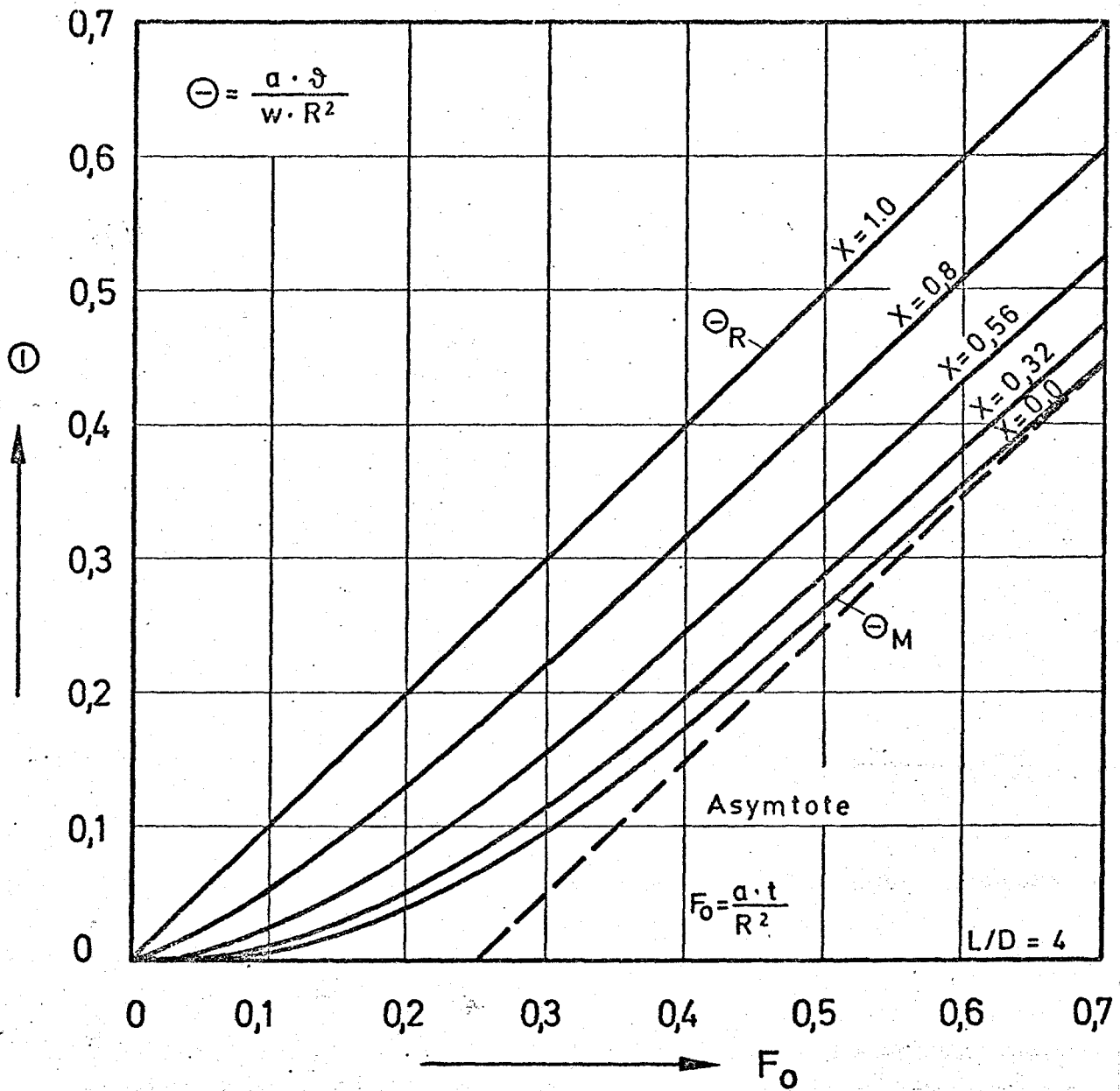


Bild 7: Dimensionslose radiale Temperaturverteilung in der Mitte schlanker Zylinder

In Bild 7 bedeuten:

$$\Theta = \frac{a \cdot \vartheta}{w \cdot R^2}, \quad \begin{aligned} a &= \text{Temperaturleitzahl} \approx 0,0052 \text{ cm}^2/\text{s} \text{ für den} \\ &\text{untersuchten Beton,} \\ \vartheta &= \text{Temperatur in } ^\circ\text{C,} \\ w &= \text{Aufheizgeschwindigkeit in } ^\circ\text{C/min,} \\ R &= \text{Probekörperradius} \end{aligned}$$

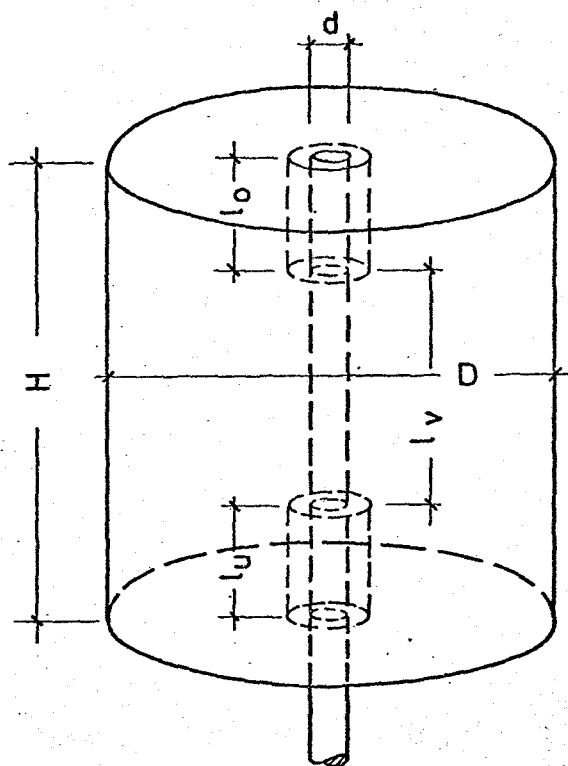
und F_o die Fourierzahl mit

$$F_o = \frac{a \cdot t}{R^2}, \quad t = \text{Zeit}$$

Rechnet man mit einer Aufheizgeschwindigkeit von $1 ^\circ\text{C/min}$ und läßt für die höheren Temperaturen einen Temperaturgradienten von $6 - 7 ^\circ\text{C/cm}$ zu⁺⁾ , so darf der maximale Probenradius 9 cm nicht überschreiten. Neben diesen thermischen Überlegungen spielen vor allem Überlegungen zur Struktur des Betons eine Rolle. So sollte z. B. die kleinste Probekörperabmessung mindestens das Fünffache des Größtkorndurchmessers betragen. Aus betontechnologischen Gründen sollte andererseits das Größtkorn von Betonmischungen jedoch nicht unter 16 mm liegen, so daß daraus ein Mindestprobendurchmesser von 8 cm folgt.

Die geometrische Gestaltung der Probekörper erfolgte in Anlehnung an die Empfehlungen von RILEM/CEB/FIP [5]. Danach soll der Probekörperdurchmesser D ungefähr 10 mal so groß sein wie der Durchmesser des Bewehrungsstahls d_e , und die Verbundlänge l_v sollte ebenso wie die verbundfreie Vorlänge l_u etwa $5 \cdot d_e$ betragen. Bei der konstruktiven Ausbildung der Probekörper (vergl. Bild 8) wurden die durch die vorhergehenden Überlegungen gewonnenen Probenabmessungen aus Zweckmäßigkeitsgründen allerdings noch etwas modifiziert. Aus Bild 8 geht beispielsweise hervor, daß die Verbundzone durch eine obere verbundfreie Zone der Dicke l_o abgeschlossen ist. Durch diese Maßnahme wird erreicht, daß in der Verbundzone eine im wesentlichen radiale Aufheizung erfolgt und daß das Temperaturfeld im Verbundbereich von Randstörungen durch die dreidimensionale Aufheizung des oberen Bereichs weitgehend frei bleibt.

+) In Anlehnung an Hochtemperaturversuche mit Probekörpern \varnothing 8 cm und 30 cm Länge, wie sie in [1] beschrieben sind.



d = Stabdurchmesser

D = Durchmesser des
Betonzylinders

l_v = Verbundlänge

l_o, l_u = verbundfreie Vorlänge

H = Höhe des Betonzylinders

Bild 8: Versuchskörper für Ausziehversuche

Zur Herstellung der Proben wurden spezielle Schalungen entwickelt (vergl. Bild 9), die auf einem Stahlrahmen, der auch die Zentrierbohrungen enthält, zu montieren sind. Der für Hochtemperaturuntersuchungen erforderlichen hohen Anzahl von Probekörpern wurde dadurch Rechnung getragen, daß drei Betoniergestelle mit jeweils vier Schalungen erstellt wurden (vergl. Bild 10). Die Probenschalung besteht aus einem längs aufgeschlitzten PVC-Rohr, das zwischen einer Stahlplatte, die auf den Rahmen aufgeschraubt ist, und einem Stahlring, der über zwei Stehbolzen mit der Stahlplatte verbunden ist, gehalten wird. Dadurch wird eine sehr gute Maßhaltigkeit der Probekörper erreicht.

Der Bewehrungsstab wird jeweils am oberen, unbelasteten Ende mit einer Zentrierbohrung versehen, in die ein kegelförmig angeschliffener Zentrierbolzen greift. An der Zugseite wird der Bewehrungsstab mit Hilfe einer Zentrierbuchse und durch zwei Klemmschrauben gehalten. Die Abgrenzung des Verbundbereichs erfolgt durch zwei Stahlrohre, deren Enden gegen das Eindringen von Beton mit einem dauerelastischen Kitt verschlossen und deren äußerer Umfang konisch abgedreht wurde, um eine Entfernung der Hüllrohre beim Ausschalen möglichst ohne großen Kraftaufwand zu ermöglichen. Durch die an die Hüllrohre angeschweißten Muttern wird das Ausschalen erleichtert. Durch eine geringe Drehung mit einem Maulschlüssel ist der Verbund zwischen Beton und Hüllrohr ohne Anstrengung einwandfrei zu lösen. Das Entfernen der Hüllrohre durch axialen Zug mit Hilfe einer Abziehvorrichtung führte dagegen, wie Vorversuche ergaben, beim Ausschalen bereits zu Schädigungen in der Verbundzone. Die Anwendung von PVC-Hüllrohren, z. B. als verlorene Schalung, kam wegen der bei der Zersetzung des PVCs bei höheren Temperaturen entstehenden Salzsäure nicht in Betracht. Vor dem Einbau der Bewehrungsstäbe in die Schalungen wird der Sitz des oberen Zentrierbolzens geprüft. Etwaige Ausmittigkeiten werden durch Verschieben des Zentrierbolzens bzw. der unteren Stahlplatte beseitigt.

Die Probekörper der Serien AZ 1 und AZ 2 wurden stehend betoniert. Die Verdichtung erfolgte mit Hilfe eines Innenrüttlers (Flaschendurchmesser: 26 mm, Verdichtungszeit: 30 sec). Nach dem Glätten der Oberfläche wurden die Probekörper mit Plastikfolie abgedeckt und nach 24 Stunden ausgeschalt. Daran schloß sich eine 7-tägige Wasserlagerung an. Danach wurden die Probekörper bis zur Versuchsdurchführung in einem Klimaraum bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte gelagert.

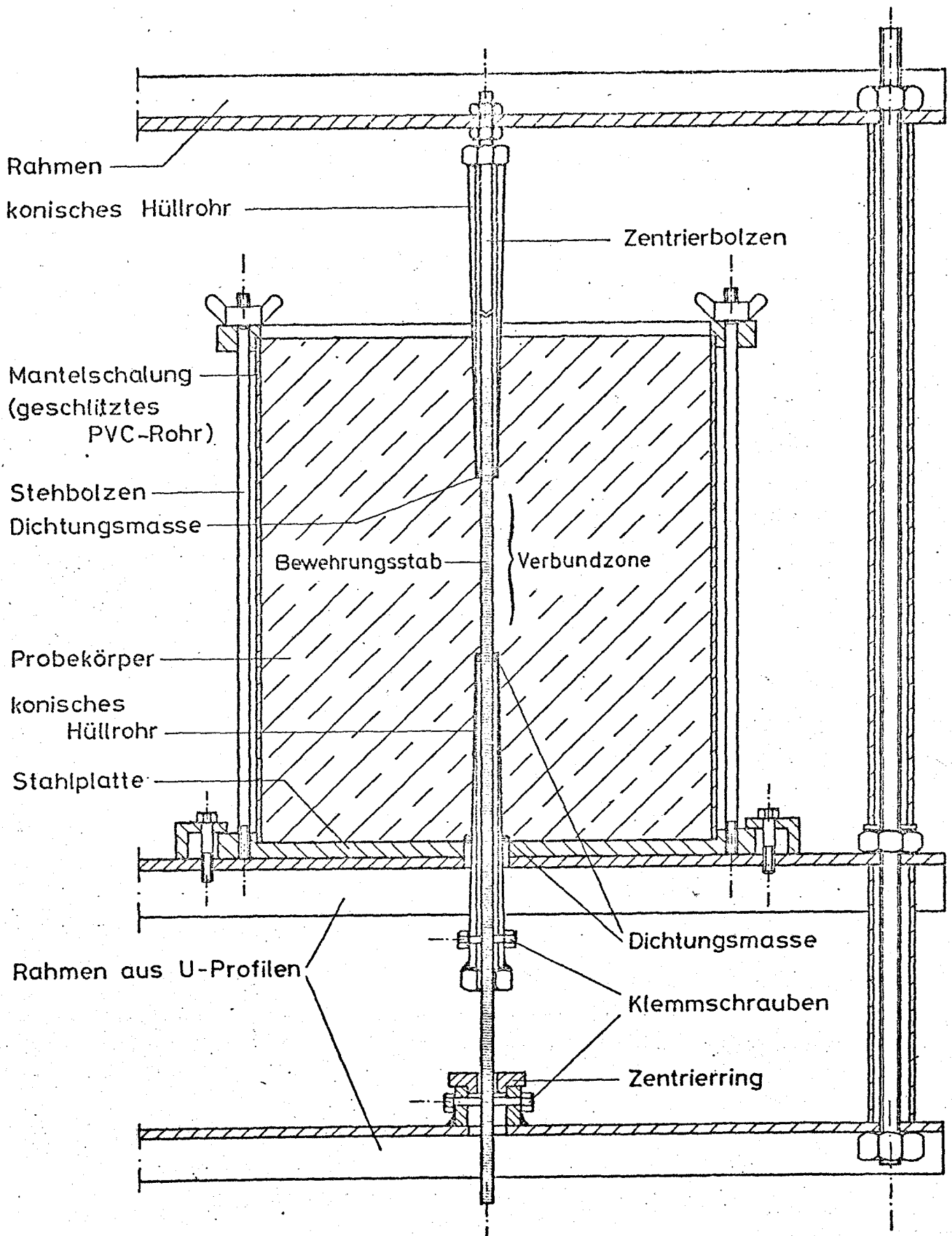


Bild 9 : Stahlschalung zur Herstellung zylindrischer Probekörper für Ausziehversuche

Zu jeder Probekörperserie wurden gleichzeitig 6 Probewürfel $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$ unter den gleichen Bedingungen hergestellt und gelagert. Zur Überprüfung der Betongüte wurde die Druckfestigkeit von jeweils 3 Würfeln am 28. Tag und zum Beginn der Durchführung der Ausziehversuche bestimmt. In Tabelle 2 sind die entsprechenden Werte der beiden in den Vorversuchen geprüften Serien AZ 1 und AZ 2 angegeben.

T a b e l l e 2
Betonfestigkeiten

Versuchsserie	Würfelfestigkeit in N/mm^2 nach 28 Tagen	Prüfalter in Tagen	Würfelfestigkeit in N/mm^2
AZ 1	54,3	150	59,2
AZ 2	47,3	290	48,4

3.2. Versuchsergebnisse

3.2.1. Thermische Beanspruchung der Probekörper

Vor Beginn der eigentlichen Ausziehversuche wurden drei Probekörper in einer provisorischen Schalung hergestellt, um das Regelverhalten des Ofens und das Aufheizverhalten der Probekörper zu untersuchen. Zur Messung der Temperaturfelder in den Probekörpern waren diese mit einer großen Anzahl von Thermoelementen bestückt. Die Bilder 11 bis 13 geben die Ergebnisse der Messungen wieder. Bild 11 zeigt die Temperaturen in der Verbundzone und auf der Mantelfläche der Proben. Man sieht, daß sich eine vergleichsweise gute und homogene Temperaturverteilung in axialer Richtung einstellt. Die maximalen Streubreiten liegen je nach Temperaturhöhe zwischen 6 und 10 K. Ferner ist die außerordentlich gute Linearität während der Aufheizung zu beachten. Bis auf den Anfahrbereich unterhalb 60°C verläuft der Temperaturanstieg linear. Im Anfahrbereich ist die geringe Nichtlinearität aufgrund des Integralverhaltens des Ofens grundsätzlich nicht zu vermeiden.

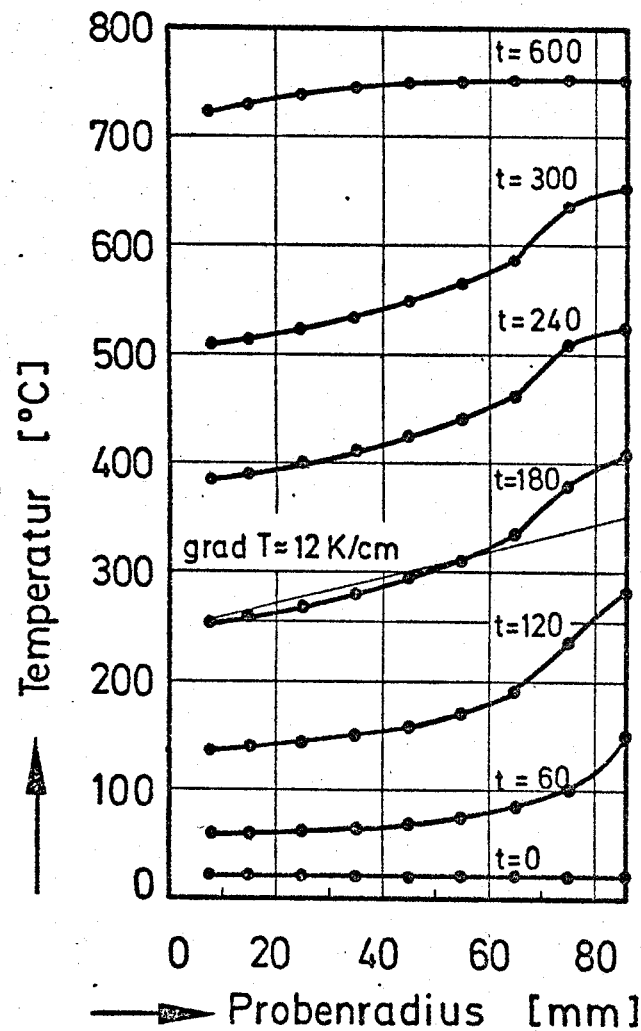
Der zeitliche Temperaturablauf in der Verbundzone weist demgegenüber einige Nichtlinearitäten, die im wesentlichen unvermeidbar sind, auf. Sie haben ihren Ursprung im wesentlichen in der Probekörpergeometrie (vergl. Abschnitt 3.1) und im physiko-chemischen Temperaturverhalten des Betons (Zersetzungs-, Verdampfungs- und Stofftransportvorgänge). Zwei dieser Vorgänge werden in Bild 11 besonders deutlich:

- a) Ein Entwässerungsvorgang bei ca. 200 °C und
- b) die Zersetzung des Portlandits (Ca(OH)_2) bei 530 °C.

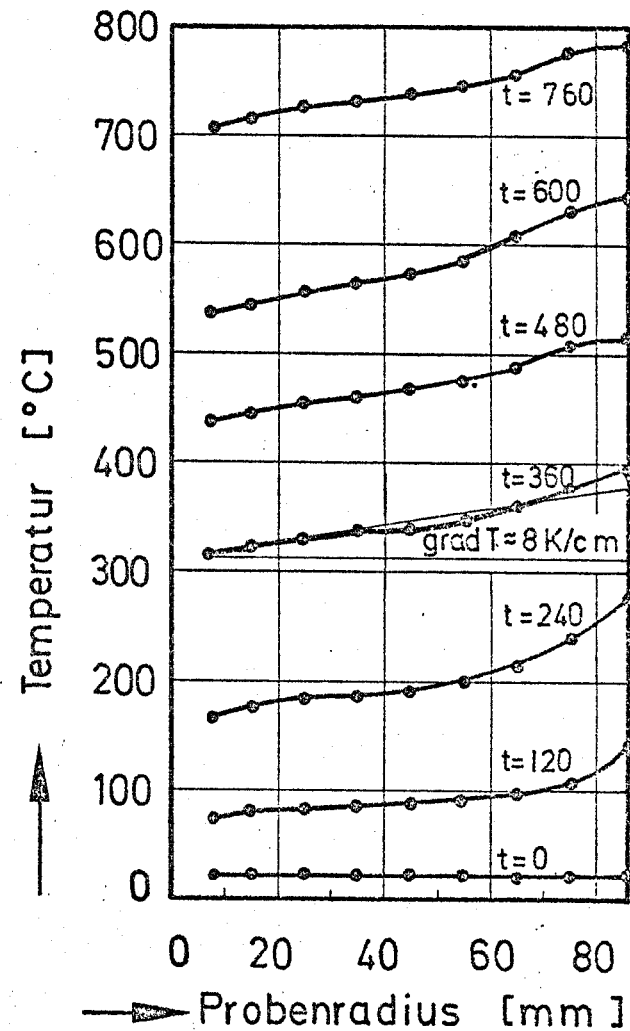
Bei der Betrachtung der radialen Temperaturprofile (vergl. Bild 12) ergibt sich ein ähnliches Bild. In der Nähe der Kontaktzone zwischen Stahl und Beton sind die Temperaturgradienten im Vergleich zum Mantelbereich gering, und zwar für beide Aufheizgeschwindigkeiten ($w = 2 \text{ K/min}$ bzw. 1 K/min). Bei der größeren Aufheizgeschwindigkeit treten jedoch im Mantelbereich Temperaturgradienten bis zu 50 K/cm auf, deren Einfluß auf das Verbundverhalten nicht mehr zu vernachlässigen sein dürfte, da sich die bei mechanischer Belastung des Probekörpers auftretenden Spannungen mit den Temperaturspannungen in nichtvorhersehbarer Weise überlagern können und in ihrer Auswirkung auf das Verbundverhalten nicht zu übersehen sind.

Bei der Aufheizung mit 1 K/min liegen die Temperaturgradienten in der Mantelzone noch in einem Bereich, der durch andere Hochtemperaturuntersuchungen an Beton [7] abgedeckt ist. Insgesamt zeigt sich, daß bei einer Aufheizgeschwindigkeit von 1 K/min bei den untersuchten Probekörpern der maximal zugelassene Temperaturgradient von 8 K/cm bis auf einen kleinen Bereich nahe der Mantelflächen eingehalten werden kann.

Der Temperaturgradient in axialer Richtung resultiert aus der Probekörpergeometrie und der Anordnung der Probe im Ofen (dreidimensionale Aufheizung im Bereich an der oberen Mantel- bzw. Stirnfläche, zweidimensionale Aufheizung in Probekörpermitte, Wärmeabführung an der unteren Stirnseite) sowie aus der Wärmeableitung durch den gegenüber Beton außerordentlich gut wärmeleitenden Bewehrungsstahl. Allerdings ist der bei einer Aufheizgeschwindigkeit von 2 K/min festgestellte axiale Temperaturgradient von $< 4 \text{ K/min}$ gegenüber dem radialen Temperaturgradienten von $< 12 \text{ K/cm}$ von geringerer Bedeutung.



Aufheizgeschwindigkeit 2K/min



Aufheizgeschwindigkeit 1K/min

Bild 12: Radiale Temperaturverteilungen in Probekörpermitte bei konstanten Aufheizgeschwindigkeiten

Entscheidend für das Verbundverhalten und besonders im Hinblick auf gute Reproduzierbarkeit der Ausziehversuche ist jedoch nicht allein der globale Temperaturgradient, sondern die Temperaturverteilung in unmittelbarer Nähe der Verbundzone. Bild 13 zeigt Temperaturprofile während der Aufheizung auf 750 °C mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 2 K/min und nach einer Temperaturstandzeit von ca. 4 h in 15 mm Abstand von der Probekörperachse. Man erkennt, daß innerhalb der Verbundzone während des gesamten Aufheizvorganges und auch während der Standzeit keine höheren Temperaturgradienten als 4 K/cm auftreten. Außerhalb der Verbundzone, d. h. in Richtung der Stirnfläche treten dagegen erhebliche Gradienten auf. Auf die Messung der Verbundeigenschaften dürften diese jedoch zu vernachlässigen sein. Bei einer Aufheizgeschwindigkeit von 1 K/min fallen diese Werte naturgemäß noch günstiger aus.

3.2.2. Kraft-Schlupf-Messungen bei hohen, konstanten Temperaturen

Im Rahmen der Vorversuche wurden zunächst einige Tastversuche zur Ermittlung des Kraft-Schlupf-Verhaltens durchgeführt (AZ 1). Dazu wurden die Probekörper mit 1,0 K/min auf die gewünschte Versuchstemperatur erwärmt, bei dieser Temperatur etwa 3 h lang homogenisiert und anschließend geprüft. Der gesamte Versuchsablauf ist auf Bild 14 schematisch dargestellt.

Ziel dieser Untersuchungen war, Angaben über die Verbundfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur zu ermitteln. Darüber hinaus sollten jedoch auch schon erste Erfahrungen über den Schlupf an den unbelasteten Stabenden gewonnen werden, weil über die Größenordnung der zu erwartenden Wege praktisch keine Erfahrungen vorliegen. Die in diesem Zusammenhang gewonnenen Meßergebnisse sind auf Bild 15 zusammengestellt. Aus dem Bild geht hervor, daß die Versuchsanordnung für die vorliegende Aufgabenstellung durchaus geeignet ist. Bis auf den einen Versuch bei Raumtemperatur zeigen alle Kraft-Schlupf-Diagramme einen qualitativ vergleichbaren Verlauf, wobei Schlupflängen bis zu 1,8 mm gut verfolgt werden konnten.

Die Versuche wurden mit einem konstanten Lastanstieg von etwa 1 kN/s durchgeführt. Dabei kam es manchmal zu einem schlagartigen Versagen der Verbundzone. Dieses wurde vor allem bei Temperaturen von 100 bis 300 °C beobachtet. Die Versuchsergebnisse reichen allerdings bei weitem nicht aus, um hierüber weiterführende Aussagen machen zu können.

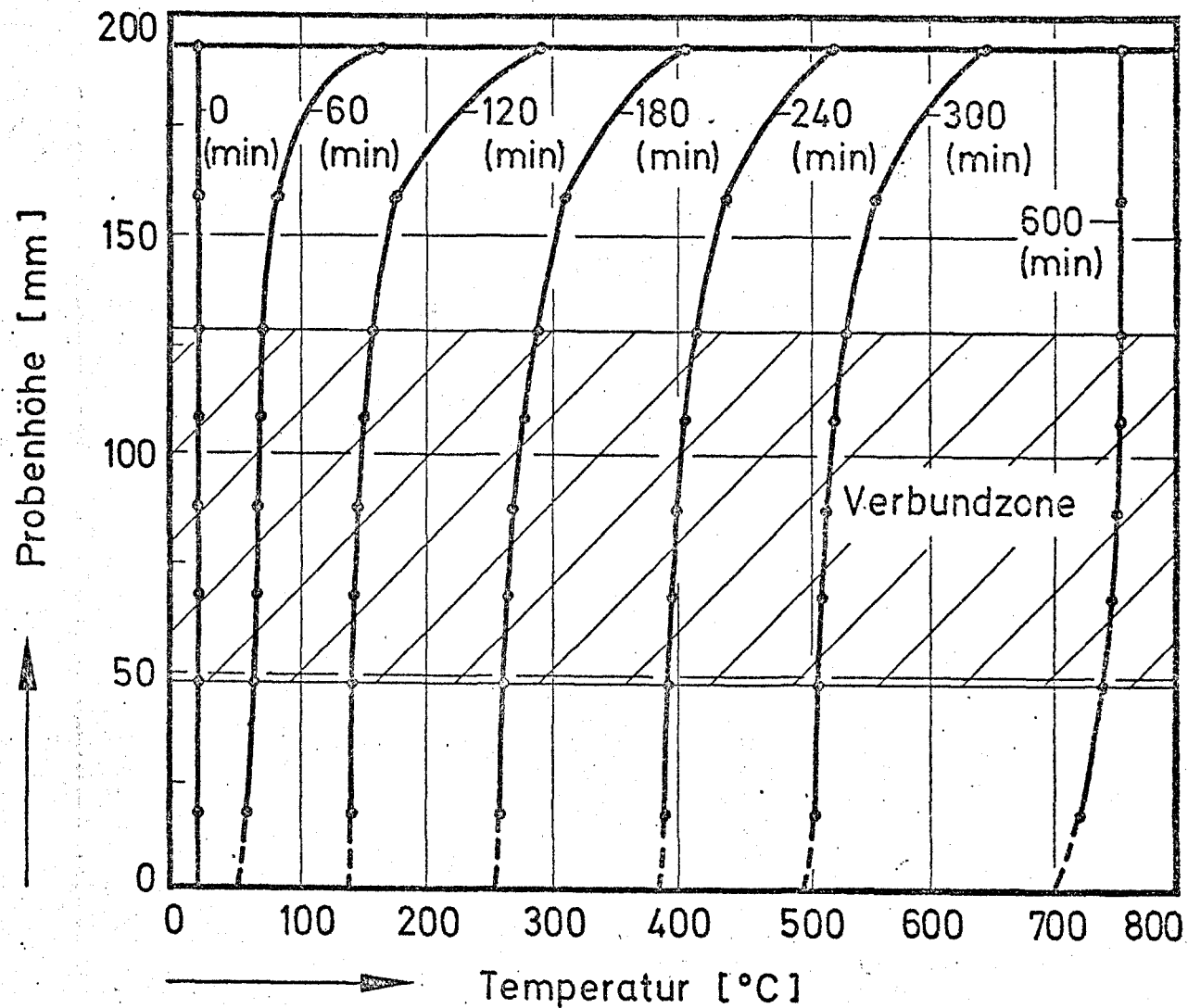
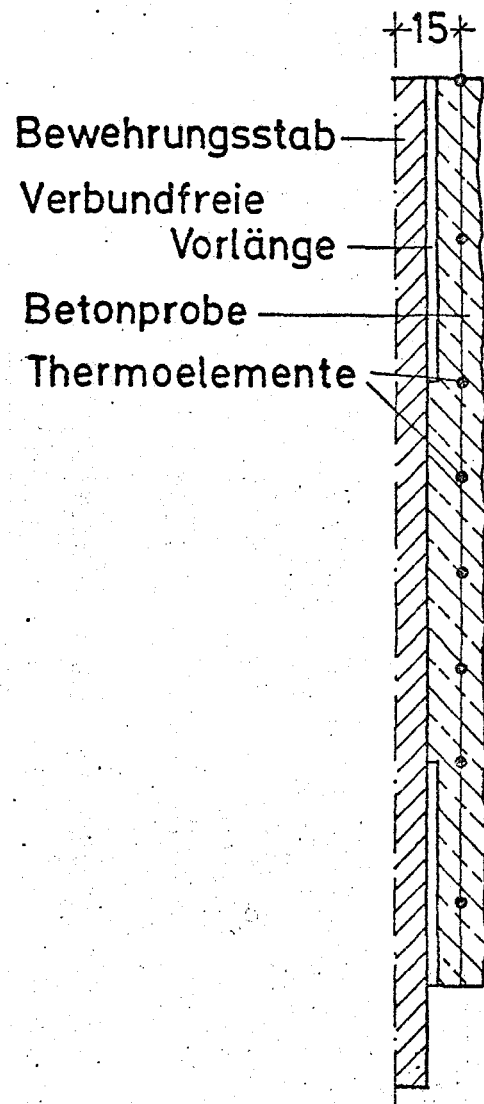


Bild 13: Vertikale Temperaturverteilung im Probekörper bei konstanter Aufheizgeschwindigkeit mit 2K/min bis 750 °C

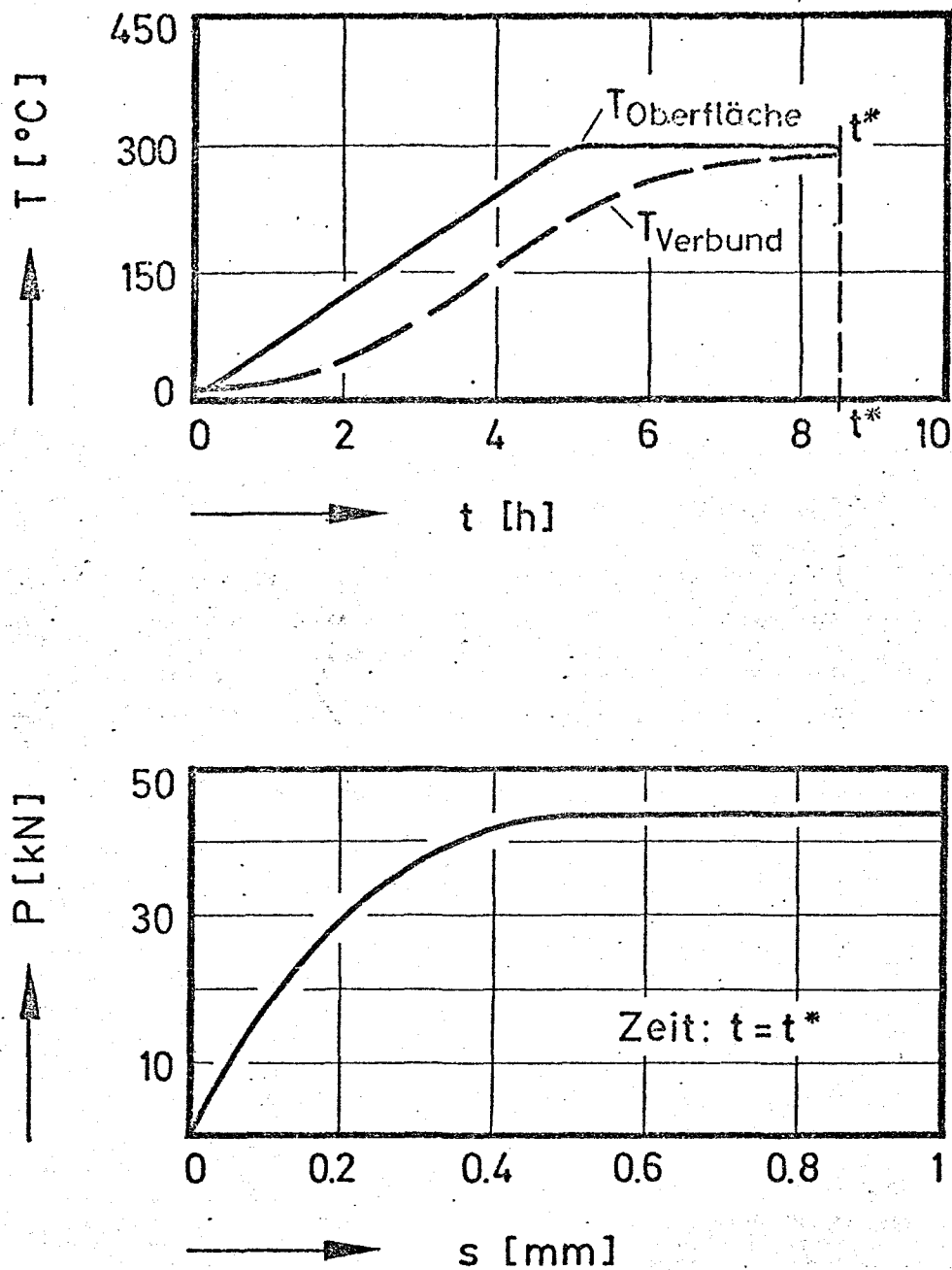


Bild 14: Versuchsablauf zur Ermittlung des Kraft-Schlupf-Verhaltens bei hohen, konstanten Temperaturen

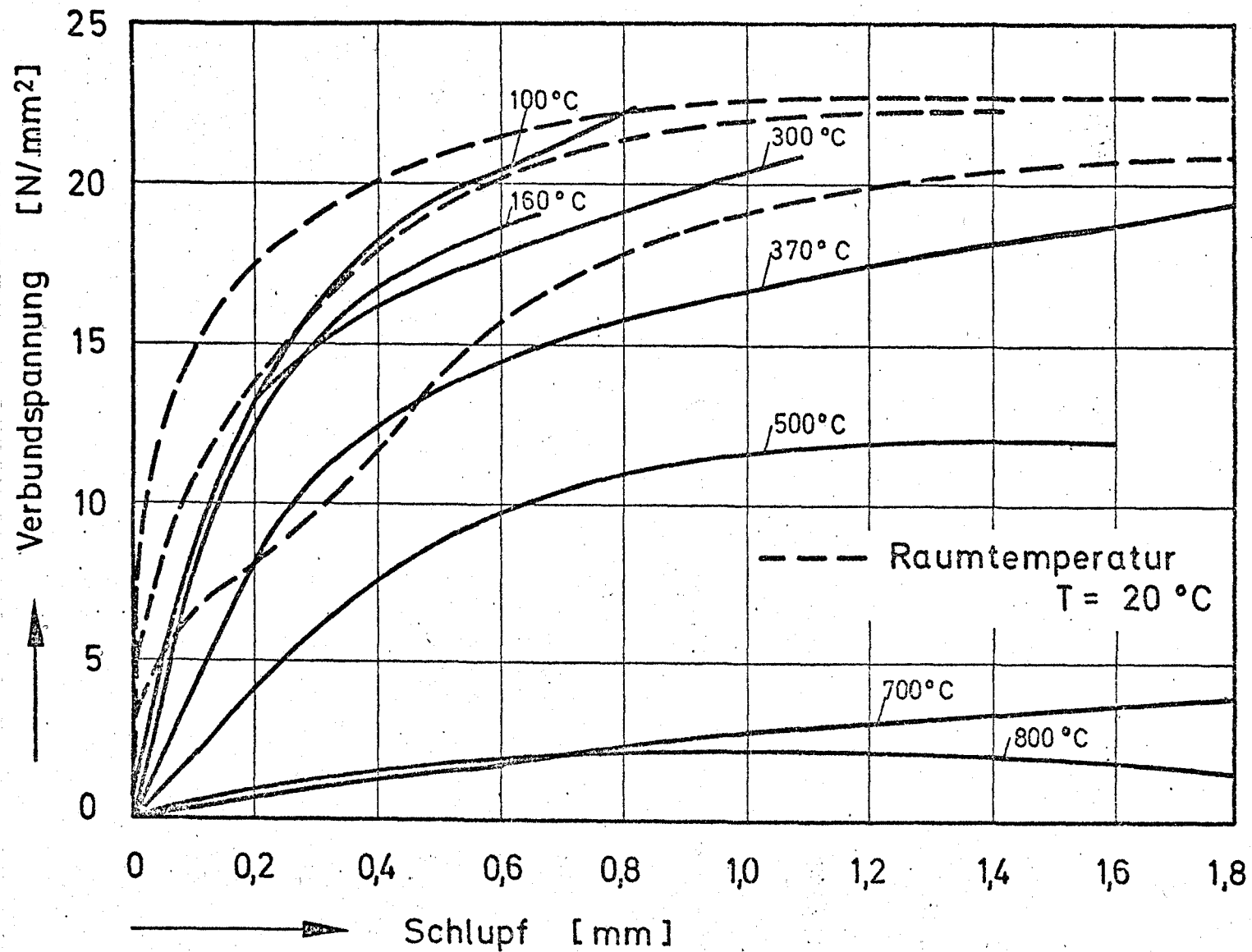


Bild 15: Kraft - Schlupf - Diagramme bei hohen konstanten Temperaturen

Eine Zusammenstellung der Verbundfestigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur für den hier untersuchten Rippenstahl läßt den Schluß zu, daß diese mit der Hochtemperaturfestigkeit des Betons verknüpft ist. Auf Bild 16 sind beispielsweise die Hochtemperatur-Verbundfestigkeit⁺⁾ und die -Beton-druckfestigkeit gemeinsam dargestellt. Daraus ergibt sich, daß beide Materialeigenschaften etwa gleichartig von der Temperatur abhängen. Die Hochtemperatur-Verbundfestigkeit liegt im Mittel jedoch niedriger als die Betondruckfestigkeit. Im Rahmen des für dieses Vorhaben beantragten Fortsetzungsantrag muß die hier angegebene Beziehung jedoch noch eingehend untersucht werden.

3.2.3. Kraft-Schlupf-Messungen bei veränderlichen Temperaturen

Eine andere Versuchsmethode, die zur Erklärung der Verbundeigenschaften geeignet ist, besteht darin, die Verbundzone bereits bei Versuchsbeginn, d. h. bei 20 °C einer definierten Spannung zu unterwerfen und anschließend die Probe so lange zu beheizen, bis der Verbund Beton/Stahl versagt. Der Versagenszeitpunkt ist erreicht, wenn die Schlupfgeschwindigkeit sehr groß (theoretisch $\rightarrow \infty$) wird. Die dem Versagenszeitpunkt zuzuordnende Temperatur in der Verbundzone wird als kritische Verbundtemperatur bezeichnet. Auf Bild 17 ist der Versuchsablauf dieser Versuchsmethode schematisch dargestellt.

Die im Rahmen dieser Untersuchung gewonnenen Ergebnisse sind auf Bild 18 angegeben (AZ 2). Bereits bei Raumtemperatur treten - wie man sieht - je nach Ausnutzung der Verbundfestigkeit Schlupfwege bis zu 0,6 mm auf. Dieser Wert ist vergleichsweise hoch (vergl. Bild 15), und man muß davon ausgehen, daß der betreffende Versuchskörper im Versuch mit mehr als 70 % (rechnerischer Wert aufgrund von Parallelversuchen bei 20 °C) belastet war. Es zeigt sich in diesem Fall sehr deutlich, daß die Verbunduntersuchungen durch Materialstreuungen außerordentlich erschwert werden. Bei der Herstellung der Probekörper sind deshalb größte Anstrengungen erforderlich, um eine weitgehende Reproduzierbarkeit der Meßwerte zu erreichen.

+) Man beachte, daß sich die hier angegebene Beziehung auf ein vergleichsweise kleines Datenkollektiv (12 Versuche) bezieht und somit zunächst nur eine erste Tendenz darstellen kann.

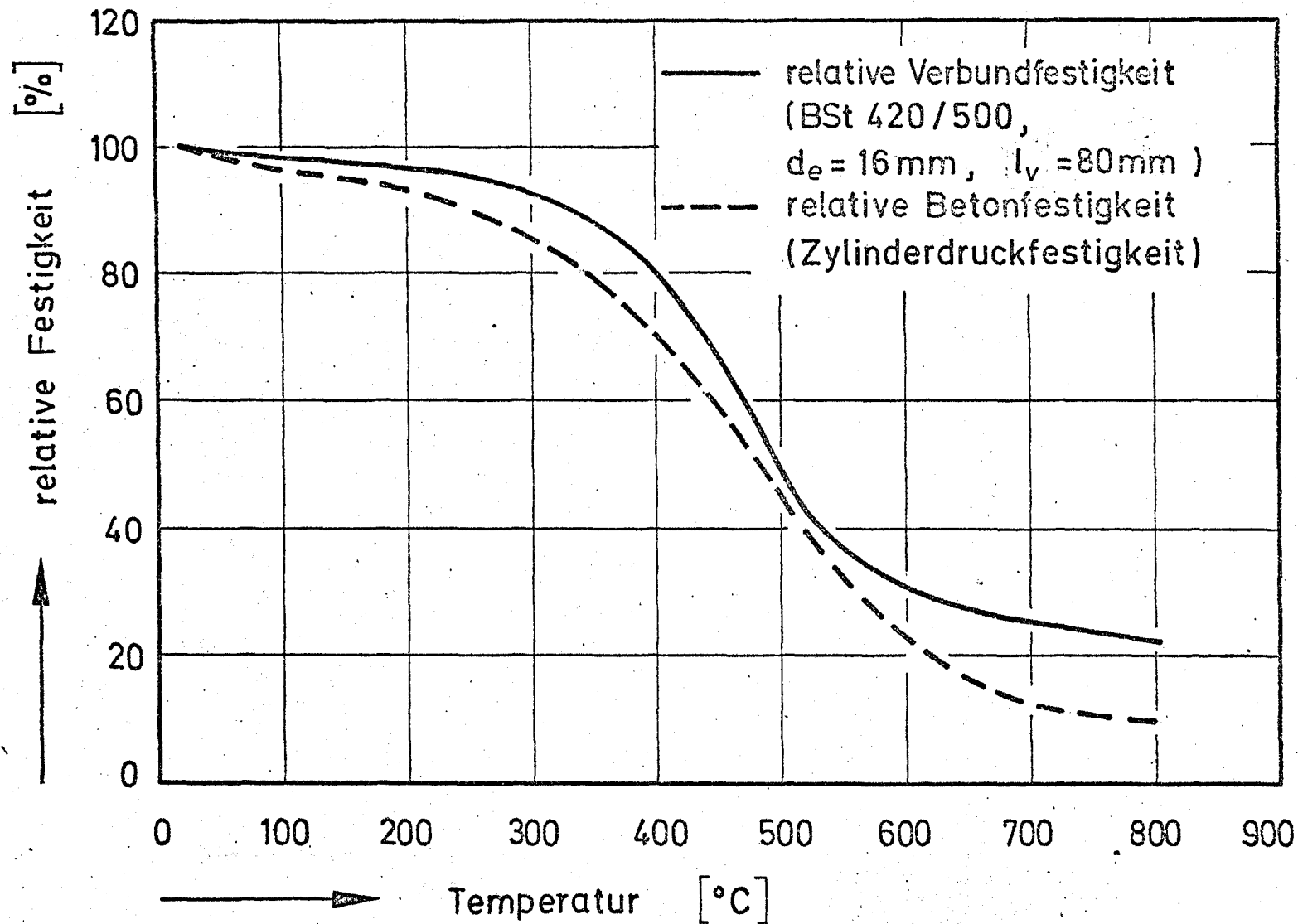


Bild 16: Relative Verbund- und Betondruckfestigkeiten bei konstanten, erhöhten Temperaturen

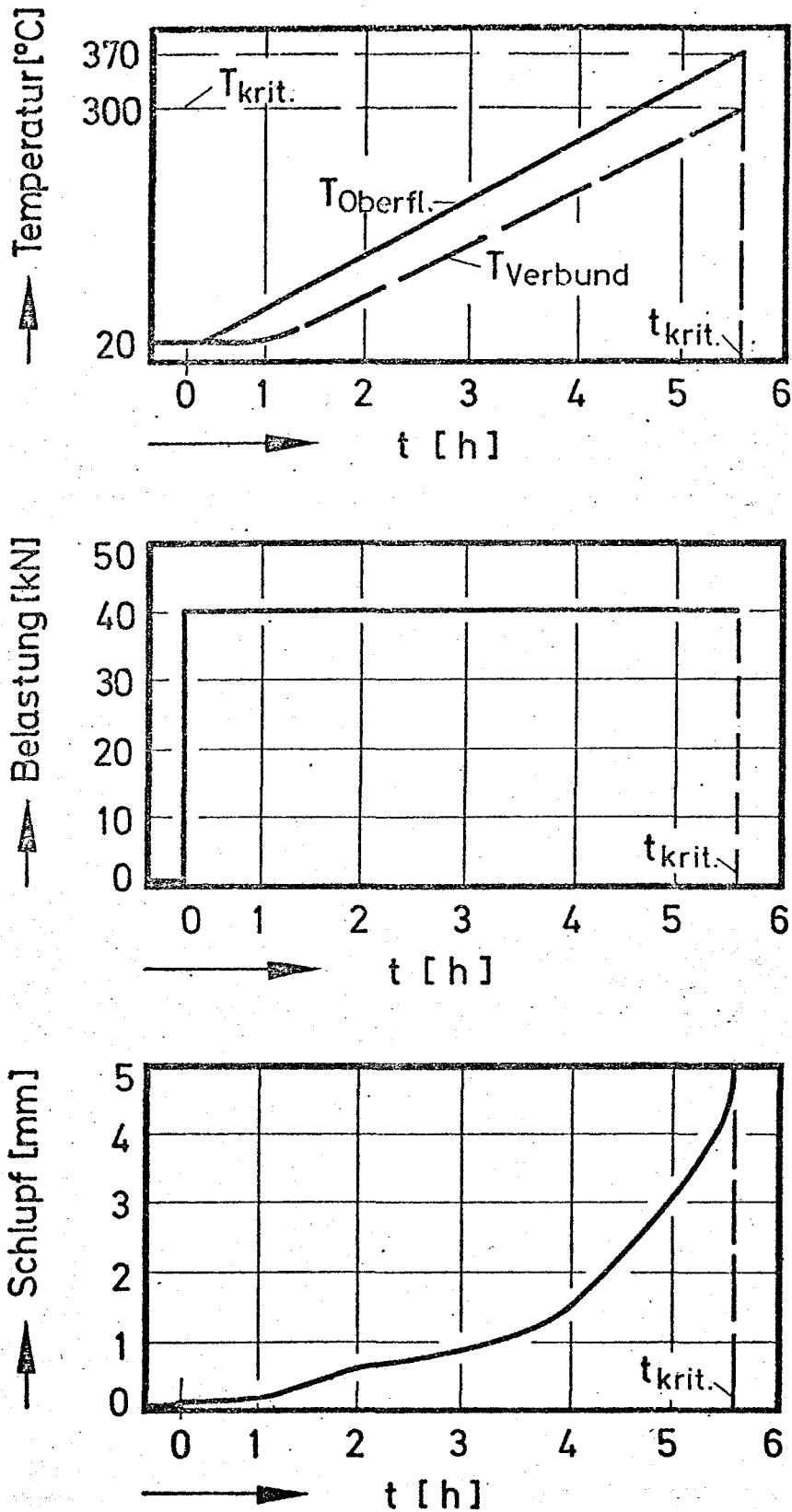


Bild 17: Versuchsablauf bei der Messung des Temperatur-Schlupf-Verhaltens bei Vorgabe einer konstanten Verbundlast während der Aufheizung

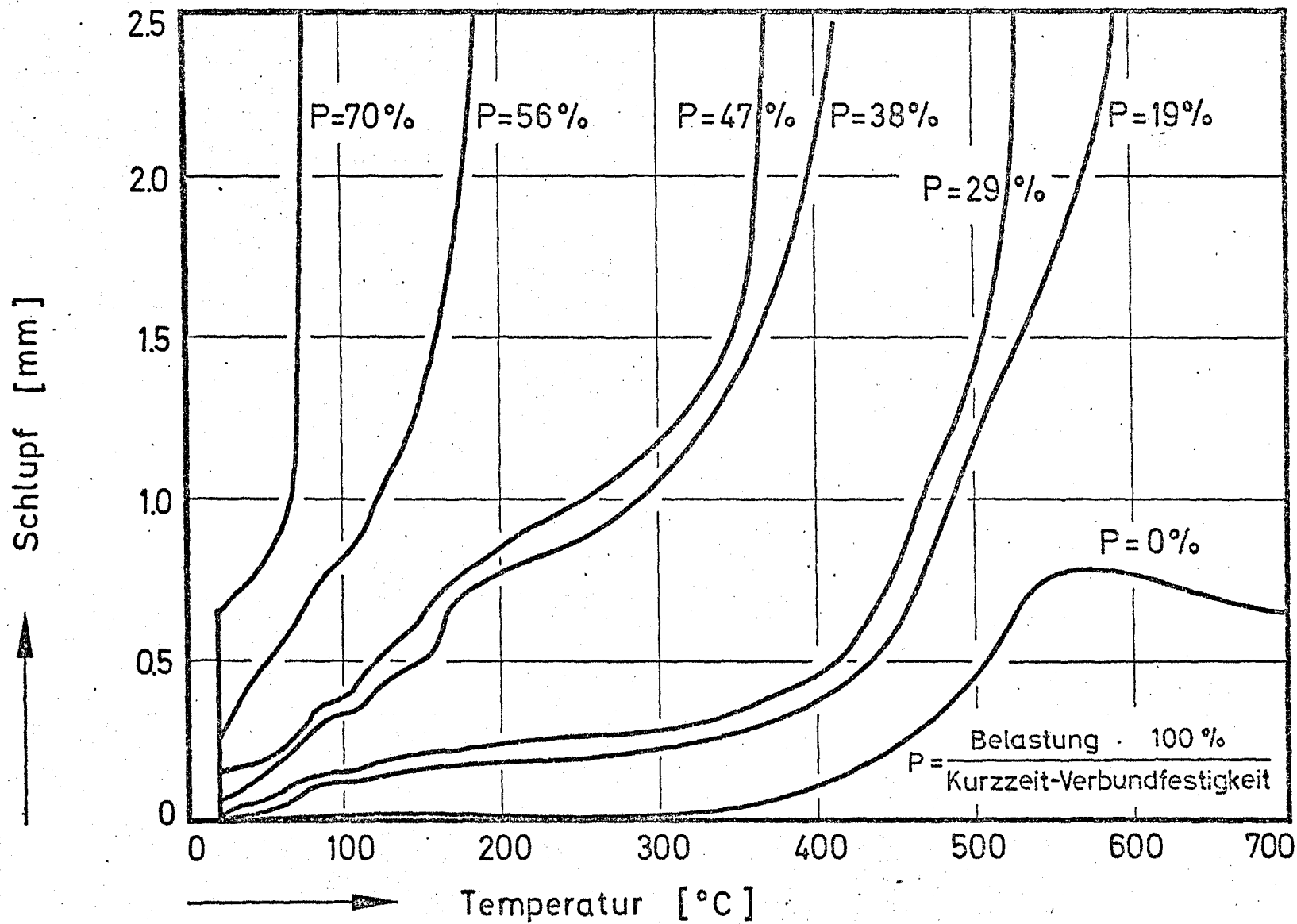


Bild 18: Temperatur-Schlupf-Verhalten bei konstanter Belastung während des Aufheizens der Probekörper

Daß die unbelastete Probe ($P = 0 \%$) von Bild 18 ebenfalls einen Schlupf anzeigt, liegt daran, daß sich der Beton und der Stahl während der Aufheizung am unbelasteten Ende unterschiedlich ausdehnen. Es wird somit ein "scheinbarer" Schlupf gemessen. Die auf dem Bild angegebenen Schlupfkurven sind somit noch mit den entsprechenden Werten für $P = 0 \%$ zu korrigieren, wenn man den "tatsächlichen" Schlupf haben will. Vergleichsmessungen haben übrigens ergeben, daß die $P = 0 \%$ -Kurve bei $\vartheta > 500^\circ\text{C}$ auf $< 0,2 \text{ mm}$ reproduzierbar ist.

Zur Bestimmung der kritischen Verbundtemperaturen genügt es, die unkorrigierten Kurven zu betrachten, weil die Schlupfgeschwindigkeit nahe der Versagenstemperatur rasch ansteigt. Der Schlupf stellt sich im Versuch allerdings nicht - wie auf Bild 18 dargestellt - quasi-kontinuierlich ein, sondern es treten im Prinzip kleine Stufen auf, die hier aufgrund der Maßstabsverhältnisse jedoch nicht mehr darstellbar sind. Die ursprüngliche Annahme, daß dieses Abgleiten in Stufen mit dem Hydraulikbetrieb (stick-and-slip-effect) zusammenhängt, konnte anhand von Versuchen mit Totlasten widerlegt werden. Im übrigen sind die Gleitstufen häufig mit gut hörbaren Geräuschen verbunden, und zwar treten die Geräusche bereits zu Zeitpunkten auf, die lange vor Erreichung der kritischen Verbundtemperaturen liegen.

Auf Bild 19 ist eine Zusammenstellung der bisher ermittelten kritischen Verbundtemperaturen gegeben. Da die Anzahl der vorliegenden Meßwerte vergleichsweise klein ist, sind bezüglich des angedeuteten Kurvenverlaufs jedoch noch Änderungen möglich. Der Vergleich von kritischen Verbund- und Betontemperaturen - letztere sind der Arbeit [7] entnommen - zeigt jedoch, daß die Verbundeigenschaften bei Temperatureinwirkung unter diesen Bedingungen deutlich stärker beeinträchtigt werden als die Festigkeitseigenschaften des Betons. Da die kritischen Betontemperaturen im Druckversuch ermittelt werden, sind die Ergebnisse der Verbundversuche damit im Prinzip allerdings nicht direkt zu vergleichen. Es wäre interessant zu wissen, welche Temperaturabhängigkeit der kritischen Betontemperaturen - die in einem Zugversuch ermittelt sind - besteht. Entsprechende Meßergebnisse liegen bisher jedoch nicht vor.

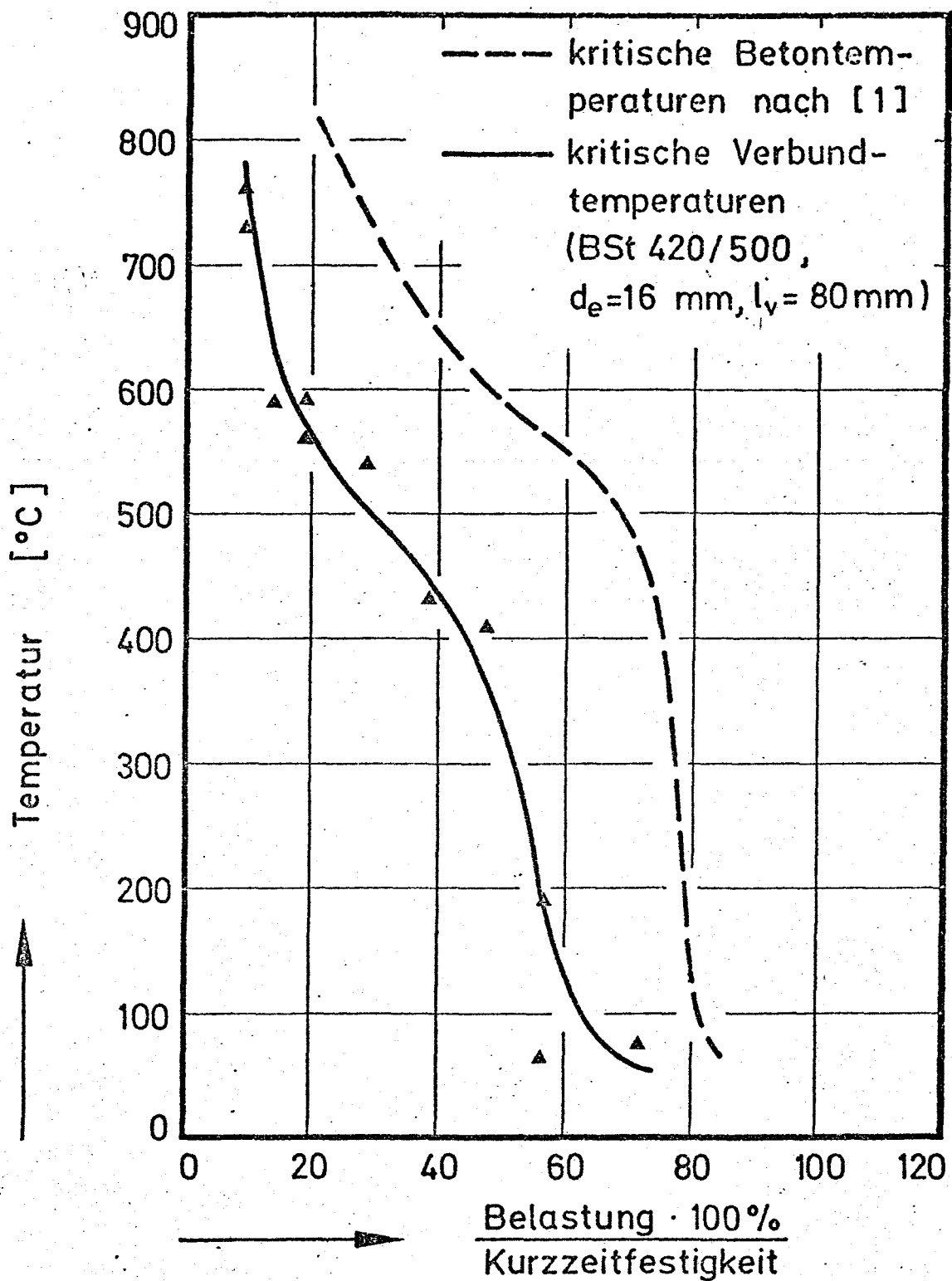


Bild 19: Kritische Verbund- und Beton-
temperaturen in Abhängigkeit
vom Ausnutzungsgrad

4. Diskussion der Ergebnisse

4.1. Apparativer Aufbau

Anhand der durchgeführten Vorversuche wurde gezeigt, daß die entwickelte Versuchsapparatur zur Durchführung von Ausziehversuchen bei konstanten und auch veränderlichen Temperaturen zwischen 20 und 800 °C geeignet ist. Ein Nachteil der Apparatur besteht darin, daß die Verbundspannungen und damit die aufzubringenden Kräfte bei sehr hohen Temperaturen vergleichsweise klein werden, so daß die Anzeigegenauigkeit der Ringkraftmeßdose nicht mehr ausreichend ist. Für solche Versuche muß eine Dose mit einem wesentlich kleineren Meßbereich verwendet werden. Das Meßprinzip und auch die Kraftregelung können im Prinzip jedoch beibehalten werden.

Im übrigen hat sich gezeigt, daß die neuartige Prüfapparatur der speziellen Aufgabenstellung entspricht und die gestellten Anforderungen erfüllt. Der relativ hohe Versuchsaufwand läßt sich nach den bisher vorliegenden Erfahrungen durch technische Verbesserungen der Apparatur voraussichtlich nicht wesentlich vermindern. Die langen Versuchszeiten hängen im wesentlichen von den zulässigen Aufheizgeschwindigkeiten ab, sind also durchweg nicht apparativ bedingt.

4.2. Ergebnisse der Vorversuche

Bei der Durchführung der Vorversuche hat sich gezeigt, daß die Herstellung, Lagerung und der Einbau der Probekörper in die Prüfapparatur mit größter Sorgfalt erfolgen muß, um zu einigermaßen reproduzierbaren Ergebnissen zu gelangen. Wie aus der Literatur bekannt ist, sind die Streuungen bei der Ermittlung der Verbundfestigkeit von Beton bei 20 °C vergleichsweise höher als z. B. die der Druckfestigkeit. Infolge der thermischen Einwirkung nehmen diese Streuungen vermutlich noch zu, so daß an die Versuchsbedingungen bei Hochtemperatur-Verbundprüfungen hohe Anforderungen zu stellen sind. Weiterhin muß davon ausgegangen werden, daß die Anzahl der durchzuführenden Versuche noch höher anzusetzen ist als z. B. bei Hochtemperatur-Druckversuchen o. ä.

Die auf den vorstehenden Bildern angegebenen Versuchsergebnisse sollten aus diesen Gründen deshalb zunächst nur als erste Information über das Verbundverhalten bei hohen Temperaturen gesehen werden. Im Rahmen der Fortsetzung dieses Forschungsvorhabens werden detaillierte Messungen und Parameterstudien durchgeführt, um die offenstehenden Fragen systematisch zu untersuchen und zu klären.

5. Zusammenfassung

Zur Ermittlung der Verbundfestigkeit und -eigenschaften bei hohen Temperaturen wurde eine Prüfapparatur entwickelt und gebaut, die es ermöglicht, Ausziehversuche (pull-out tests) bei Temperaturen bis zu 800 °C durchzuführen. Die Anlage besteht aus einem servohydraulischen Belastungssystem, einem Dreizonen-Kammerofen und einer Schlupfmeßeinrichtung und gestattet eine Durchführung von Kraft-Schlupf-Messungen bei konstanten und veränderlichen Temperaturen. Alle wesentlichen Meßgrößen werden digital angezeigt bzw. kontinuierlich erfaßt.

In einer Reihe von Versuchen wurden die thermischen Eigenschaften des Kammerofens untersucht und die in den vorgesehenen Probekörpern unvermeidbar auftretenden Temperaturgradienten ermittelt. Anhand dieser Versuche wurden zweckmäßige Temperatur- bzw. Aufheizprogramme für die Verbundprüfungen festgelegt. Als notwendig und vorteilhaft hat sich in diesem Zusammenhang die Dreizonen-Regelung des Kammerofens herausgestellt.

Im Rahmen der Voruntersuchung wurde die gesamte Ausziehapparatur geeicht und getestet. Dabei konnten bereits erste Informationen über das Verbundverhalten bei hohen Temperaturen gewonnen werden. Für einen Rippentorstahl (BSt 420/550 RK) wurden sogenannte Kraft-Schlupf-Diagramme bei hohen konstanten Temperaturen ermittelt, so daß der Temperatureinfluß auf die Verbundfestigkeit abgeschätzt werden konnte. Weiterhin wurden sogenannte Temperatur-Schlupf-Versuche durchgeführt, d. h. die Probekörper wurden bei 20 °C belastet und anschließend kontinuierlich - bis zum Versagen - aufgeheizt. Anhand solcher Messungen konnten erstmalig kritische Verbundtemperaturen bestimmt werden.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Schneider, U., U. Diederichs und R. Weiß: Sonderforschungsbereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen, Arbeitsbericht 1975 - 1977, 1977 Teil II, B3-1 - B3-95.
- [2] Ruge, J., und O. Winkelmann: Sonderforschungsbereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Arbeitsbericht 1975 - 1977, 1977 Teil II, B4-1 - B4-56.
- [3] Schneider, U.: "Untersuchung eines Ofens für Warmkriechversuche an Beton". Diplomarbeit, 1970, TU Braunschweig.
- [4] Eibl, J., und J. Iványi: "Studie zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton". DAfStB 1977, Heft 260, S. 23 ff.
- [5] RILEM, III: "Bond tests for reinforcing steel, 2. Pull-out test". in: Tests and specifications of reinforcements for reinforced and pre-stressed concrete, RILEM 3 (1970), No. 15, p. 175 - 178.
- [6] Paschen, H., J. Steinert und O. Hjorth: "Untersuchung über das Verbundverhalten von Baustählen bei Kurzzeitbeanspruchung". Bericht über den Forschungsauftrag des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, B II 9-810705 - 135/3, 1974.
- [7] Schneider, U.: "Zur Kinetik festigkeitsmindernder Reaktionen in Normalbetonen bei hohen Temperaturen". Dissertation, TU Braunschweig, 1973.